

**Mónica Maria Soares Lamas**

Licenciada em Ciências da Engenharia Física



## **Reestruturação do Sistema de Calibração de Magnetómetros para Aplicações Espaciais**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Física

Orientador: Yuri Nunes, Professor Auxiliar, FCT-UNL  
Co-orientador: David Mesquita, Gestor de Projecto,  
Lusospace

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Orlando Manuel Neves Duarte Teodoro  
Arguente(s): Prof. José Luís Constantino Ferreira  
Vogal(ais): Prof. Yuri Fonseca da Silva Nunes  
Engenheiro David Mesquita



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Outubro 2012**







## **Copyright**

Copyright©2012 – Em nome de Mónica Maria Soares Lamas, aluna da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

O meu agradecimento cordial,

Ao Professor Yuri Nunes, meu orientador, por me proporcionar este projecto de mestrado, pelo acompanhamento do trabalho, pelo conhecimento partilhado, pelas correcções e sugestões e pelas palavras de incentivo.

Ao David Mesquita, meu co-orientador, pela disponibilidade, competência e orientação, pelas críticas e sugestões e pelos momentos descontraídos.

Ao Professor Orlando Teodoro, coordenador do Mestrado Integrado em Engenharia Física, pela disponibilidade, generosidade e apoio incansáveis.

Ao Ricardo Oliveira, tantas vezes meu parceiro de trabalho, pela paciência, disponibilidade, pelas correcções, sugestões, pelo apoio e amizade.

Ao Ivo Vieira e ao Paulo Romeu, pela oportunidade de realizar o meu projecto de estágio numa empresa tão distinta como a Lusospace e que me fez prosperar enquanto pessoa e profissional.

À minha família por me proporcionar a oportunidade de frequentar o ensino superior, pelo apoio e dedicação e também pela paciência. Aos meus irmãos Bernardo e Rodrigo Lamas, espero continuar a ser merecedora da vossa admiração. E em particular à minha prima Joana Soares pelo sorriso, pelas alegrias, pelo amor e carinho incondicionais e pelas palavras de conforto insubstituíveis.

Ao David Amoêdo, Diogo Miguel, Tiago Castro e Tiago Freitas, pela paciência, pelo apoio, pelas longas conversas, pelo incentivo, pelo orgulho e entusiasmo, pela perseverança e por toda a amizade e carinho ao longo destes anos.

Aos meus amigos, sempre presentes e sem os quais tudo teria sido mais difícil, Isabel Couto, Luís Silva, Miguel Moita, Sara Candeias e Tiago Cunha, pela lealdade, companheirismo e amizade.

À Patrícia Borges de Sousa pela amizade desde o primeiro dia, pelas noites dormidas em sua casa e por fazer parte deste percurso tão importante.

A todos os que contribuíram para as boas recordações que guardo destes anos, o meu sincero obrigada.





## Resumo

Nos sensores utilizados em sistemas de controlo de orientação e posicionamento em órbita (AOCS - Attitude and Orbit Control System) de satélites artificiais como o caso do sensor de campo magnético, magnetómetro, para serem qualificados para utilização no espaço, é necessário que executem medições fiáveis e precisas. Para tal, estes sensores requerem um método de calibração apropriado e exigente. Este trabalho tem como objectivo reestruturar e otimizar o actual sistema de calibração de magnetómetros existente na empresa Lusospace, que produz e comercializa este tipo de sensores para indústria espacial.

O sistema de calibração na base do trabalho, é constituído por: Um conjunto de três pares de bobinas Helmholtz que geram um campo magnético uniforme no seu centro geométrico; Um sistema de aquisição de dados; E uma interface feita com recurso ao software *LabVIEW*, que integra o controlo e aquisição de alguns equipamentos do sistema de calibração. A reestruturação deste sistema foca-se, precisamente, sobre estes três subsistemas fundamentais.

No que diz respeito ao sistema de aquisição existente, procedeu-se à substituição do *hardware* de interface entre o magnetómetro e o sistema de aquisição de dados. Para isso, serão desenhadas e construídas novas placas de circuito impresso (PCB), tendo sempre em mente o aumento da fiabilidade e a necessidade de minimizar as incertezas associadas a cada aquisição. Quanto à interface em *LabVIEW*, esta foi refeita de raiz por forma a responder aos novos requisitos e tem por base as linhas gerais dos procedimentos da interface já existente. Por último, no sistema de Helmholtz, responsável pela geração do campo magnético, que apesar de não ser necessário efectuar alterações à sua estrutura física, será feita uma nova caracterização do sistema com o intuito de determinar eventuais alterações aos parâmetros associados tanto à geração, como à medição do campo magnético.



## Abstract

Sensors for spacecraft's Attitude and Orbit Control Systems (AOCS) applications, as a magnetic field sensor, magnetometer, to become space qualified must perform reliable and accurate measurements. To this end, these sensors require proper calibration. The purpose of this project is to improve and restructure the current magnetometer's calibration system existing at Lusospace Company.

This calibration system consists essentially of a set of three pairs of Helmholtz coils which generate an uniform magnetic field at its geometric centre; A data acquisition system from magnetometers; And an interface made using *LabVIEW* software, which integrates the control and acquisition of some calibration system's equipment. The improvement of this system focuses precisely on these three key elements.

As for the existing data acquisition system, the hardware interface between magnetometer and data acquisition system will be replaced. In order to do this, new printed circuit boards (PCBs) will be designed and created but always bearing in mind the need to minimize the errors associated with each acquisition. As regards to the *LabVIEW* interface, it will be reworded in order to respond to new requirements, always based on the existing interface's model. Finally, in the Helmholtz system no changes are made to its structure but there will be a new characterization of the system in order to determine any changes to the parameters associated to both the generation and measurement of the magnetic field.



## Nomenclatura

$B$	Campo magnético
$N$	Número de espiras
$I$	Corrente
$a$	Raio/lado da bobina
$d$	Distância entre bobinas

## Constantes

$\mu_0$	Permeabilidade magnética do vácuo
---------	-----------------------------------

## Acrónimos

AOCS	Attitude and Orbit Control System
TAM	Three-Axis Magnetometers
CEFITEC	Centro de Física e Investigação Tecnológica
LS	Lusospace
PCB	Printed Circuit Board
GPIO	General Purpose Interface Bus
DAQ	Data Acquisition
USB	Universal Serial Bus
PC	Personal Computer
AMR	Anisotropic Magnetoresistive
PPM	Proton Precession Magnetometer
OPM	Optically Pumped Magnetometer
CNC	Controlo Numérico Computorizado
STEP	STandard for the Exchange of Product model data
VIPM	VI Package Manager
LIFA	<i>LabVIEW</i> Interface For Arduino
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia



# Índice Geral

Capítulo I - Contextualização .....	1
Capítulo II - Introdução .....	1
II.1. Magnetómetros.....	3
II.2. Sistema de Helmholtz.....	6
II.3. Sistema de calibração.....	8
Capítulo III - Reestruturação do sistema de calibração.....	11
III.1. Desenho de Placas de Circuito Impresso (PCB).....	12
III.1.1. Módulo de Aquisição do MAG15.....	14
III.1.2. Módulo de Aquisição do MAG28.....	19
III.2. Integração do novo <i>hardware</i> .....	23
III.3. Desenvolvimento de ferramentas em <i>LabVIEW</i> .....	24
III.3.1. Interface do software de aquisição.....	25
Capítulo IV - Procedimento de calibração dos magnetómetros da Lusospace.....	31
IV.1. Tratamento dos dados da calibração.....	32
IV.1.1. Factor de escala.....	32
IV.1.2. Linearidade.....	34
IV.1.3. Ruído e <i>offset</i> .....	34
IV.1.4. Potência consumida.....	34
IV.1.5. Alinhamento e ortogonalidade.....	34
Capítulo V - Conclusão e perspectivas futuras.....	37
Capítulo VI - Bibliografia.....	39
Apêndice A .....	41





## Índice de Figuras

Figura II.1 - Composição de um magnetómetro do tipo fluxgate [11]. .....	4
Figura II.2 - Estados de saturação do núcleo. Quando o núcleo se encontra fora do estado de saturação existe variação da intensidade fluxo magnético no núcleo e é induzida uma força electromotriz. Por outro lado, quando o núcleo está saturado o fluxo deixa de se concentrar no núcleo, seja qual for o campo a que estiver exposto [10]. .....	4
Figura II.3 - Esquema de uma ponte de Wheatstone de um sensor AMR utilizada na detecção do campo magnético [12]. .....	5
Figura II.4 - Diagrama de blocos simplificado do magnetómetro da Lusospace. ....	5
Figura II.5 - Esquema de um sistema de Helmholtz simples [14]. .....	6
Figura II.6 - Exemplo da arquitectura do sistema de Helmholtz da Lusospace [17]. .....	6
Figura II.7 - Campo magnético gerado pela passagem de uma corrente eléctrica que passa por um elemento rectilíneo infinitesimal [18]. .....	7
Figura II.8 - Referencial cilíndrico para a) sistema de bobinas circulares. b) sistema de bobinas quadradas [19]. ....	7
Figura II.9 - Diagrama funcional do sistema de aquisição de dados da Lusospace. ....	8
Figura III.1 - Esquema simplificado da interface MAGs/PCB/DAQ. ....	11
Figura III.2 - Estrutura da organização dos projectos criados para a construção dos módulos de aquisição do MAG15 e MAG28. ....	12
Figura III.3 - Janela de propriedades do conector DB37 da Multicomp criada pelo utilizador e pertencente à biblioteca Mag Int Library.IntLib. ....	13
Figura III.4 - Footprint do conector DB37 da Multicomp desenhado de raiz no Altium e adicionado à nova biblioteca Mag Int Library.IntLib. ....	14
Figura III.5 - Esquemático do circuito eléctrico do módulo de aquisição do MAG15. ....	16
Figura III.6 - a) Camada Top da PCB; b) Camada Bottom. ....	17
Figura III.7 - Lista dos ficheiros drill e gerber gerados a partir do Altium. ....	17
Figura III.8 - Aspecto final da PCB após a soldadura de todos os componentes. ....	18
Figura III.9 - Caixa e respectiva PCB, cujas faces foram cortadas com recurso a uma CNC, e que compõe o módulo de aquisição do MAG15. Identificação dos elementos que são ligados a esta face: DAQ e PSU-Power Supply Unit com +15 e -15V e ground. ....	18

Figura III.10 - Exemplo do circuito do regulador LM117 presente no datasheet e que foi usado como base no dimensionamento do circuito do regulador de tensão do módulo de aquisição do MAG15 [22].	19
Figura III.11 - Circuito final do regulador de tensão incorporado no módulo de aquisição do MAG28.	19
Figura III.12 - Esquemático do circuito eléctrico do módulo de aquisição do MAG28.	21
Figura IV.13 - Camada a) Top b) Bottom da PCB.	21
Figura III.14 - a) Aspecto final da PCB do módulo de aquisição do MAG28 com os respectivos componentes. b) Vista da soldadura do conector DB9.	22
Figura III.15 - Exemplo de uma das faces de um módulo de aquisição à qual são ligados os cabos de sinal do MAG15/28 e do MAG REF e os de alimentação do MAG15/28.	22
Figura III.16 - a) Cabo que liga o módulo de aquisição à carta da DAQ. b) Ligações dos sinais provenientes de um módulo de aquisição aos canais da carta Agilent 34901A [23].	23
Figura III.17 - Arquitectura completa do sistema de calibração da Lusospace após reestruturação no hardware.	23
Figura III.18 - Aspecto do a) Painel Frontal e do b) Diagrama de blocos de um VI.	24
Figura III.19 - a) Paleta de controlos; b) Paleta de funções.	25
Figura III.20 - Primeira janela de interface com o utilizador.	26
Figura III.21 - Interface relativa aos parâmetros do a) MAG15. b) MAG28.	27
Figura III.22 - Painel frontal/interface do novo software criado em LabVIEW.	28
Figura III.23 - Exemplo de funcionamento da função SWEEP cuja amplitude e step são, respectivamente, e para os três eixos: a) 60.000 nT e 30.000 nT; b) 60.000 nT e 10.000 nT.	29
Figura IV.1 - Disposição dos magnetómetros no sistema de Helmholtz [25].	31
Figura IV.2 - Representação dos referenciais dos sensores do MAG REF e do MAG15/28 [26].	32
Figura IV.3 - Representação da relação entre os eixos dos magnetómetros e sistema de Helmholtz. Sendo índice “c-coils” correspondente às bobinas, “m-mag” ao MAG15/28 e “r-ref” ao MAG REF [26].	32
Figura IV.4 - Alinhamento dos referenciais dos sensores com os respectivos referenciais fixados para os magnetómetros.	35

## Índice de Tabelas

<b>Tabela III.1</b> - <i>Pin-out</i> correspondente ao conector a) DB25 do MAG15; b) DB9 do MAG REF .....	14
<b>Tabela IV.1</b> - Exemplo de uns possíveis requisitos exigidos por um cliente para o seu magnetómetro .....	35



## Capítulo I - Contextualização

O projecto descrito nesta dissertação foi realizado na empresa LusoSpace (LS) ao abrigo da colaboração existente entre o Laboratório de Plasmas e Aplicações (LPA) do CEFITEC. A Lusospace é uma empresa portuguesa que se dedica ao desenvolvimento e comercialização de tecnologias aeroespaciais, de entre as quais magnetómetros. O foco do projecto incide, precisamente, na reestruturação e aperfeiçoamento do actual sistema de calibração utilizado pela Lusospace na calibração dos seus magnetómetros e, ainda, na caracterização do sistema de Helmholtz [1], parte integrante do mesmo sistema de calibração.

Aquando do lançamento de um qualquer veículo espacial, como por exemplo um satélite, existe a preocupação de o controlar e fazer cumprir a missão para a qual foi projectado. Para isso, é necessário ter um sistema de navegação e controlo que dê informações como a posição, velocidade e trajectória ou órbita do satélite em questão. Além disto, é ainda importante determinar a sua atitude, que consiste na orientação espacial do satélite em relação a um sistema de coordenadas de referência [2]. Para a determinação da atitude, o satélite deverá ser dotado de um sistema de controlo de orientação e posicionamento em órbita (AOCS), composto por diversos sensores, nomeadamente, sensores de campo magnético, ou magnetómetros.

Sensores de campo magnético vectoriais, ou *Three-Axis Magnetometers* (TAM), são amplamente utilizados ao nível espacial e são bastante úteis já que fornecem a intensidade, direcção e sentido do campo magnético a que são sujeitos. Adicionalmente, são leves, confiáveis, desprovidos de partes móveis, têm baixos consumos e pouca necessidade de manutenção [3].

Outro aspecto importante a ter em conta é a precisão das medidas de campo magnético obtidas pelo sensor. Assim sendo, o sistema de calibração, bem como o método de calibração dos magnetómetros, tornam-se um factor determinante na obtenção de resultados fidedignos [4].

O sistema utilizado pela Lusospace na calibração dos seus magnetómetros é composto por:

- ◆ Sistema de Helmholtz de três bobinas quadradas e independentes;
- ◆ Fonte de alimentação do sistema de Helmholtz controlada por GPIB;
- ◆ Fonte de alimentação dos magnetómetros;
- ◆ Interface entre sistema de aquisição e os magnetómetros;
- ◆ Sistema de aquisição de dados, DAQ, controlado por GPIB;
- ◆ Interface USB/GPIB que permite o controlo dos equipamentos através do *software LabVIEW* instalado num computador;
- ◆ Magnetómetro de referência;
- ◆ Magnetómetro a ser calibrado.

Em acordo com a Lusospace ficou decidido que, dos elementos acima mencionados e constituintes do sistema de calibração em questão, seriam passíveis de reestruturação, o *hardware* de interface entre o sistema de aquisição e o magnetómetro bem como, o programa de aquisição e controlo desenvolvido com recurso ao *LabVIEW*. Adicionalmente, e dadas as alterações efectuadas, será feita uma nova caracterização do sistema de Helmholtz com o intuito

de obter informação sobre os novos parâmetros e características associados tanto à geração como à medição de campo magnético desse mesmo sistema.

A presente dissertação está dividida em três secções. No capítulo II será feita uma introdução com uma descrição dos constituintes do sistema: magnetómetros, sistema de Helmholtz e sistema de calibração. No capítulo III são apresentadas as alterações feitas ao sistema de calibração quer ao nível de *hardware*, quer de *software*. No capítulo IV é apresentado o procedimento de calibração adoptado pela Lusospace na calibração dos seus magnetómetros. Por fim, no capítulo V serão feitas as conclusões sobre o projecto e as perspectivas futuras.

## Capítulo II - Introdução

No primeiro subcapítulo descreve-se o que é um magnetómetro, que tipos de magnetómetro existem e, adicionalmente, é feita uma breve explicação da configuração dos tipos de magnetómetros usados no âmbito deste trabalho.

Em seguida é apresentado o conceito base de um sistema de Helmholtz simples e do sistema de Helmholtz efectivamente utilizado.

No terceiro, e último, subcapítulo são expostos os requisitos de funcionamento do sistema de calibração juntamente com os instrumentos que o compõem.

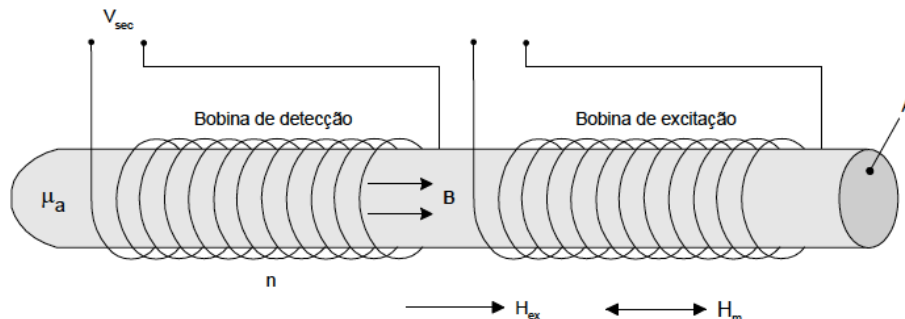
### II.1.Magnetómetros

Um magnetómetro consiste num sensor de campo magnético capaz de medir, *in loco*, a intensidade e, em alguns casos, a direcção do campo magnético. Este tipo de sensor é utilizado tanto no espaço como na Terra sendo que a sua vertente para aplicações no espaço se destina, maioritariamente, à observação e estudo do campo magnético terrestre, à orientação espacial de um satélite ou à detecção de actividade solar anormal. Na Terra estes sensores são utilizados, por exemplo, por geólogos na procura de minerais eventualmente presentes numa determinada zona da crosta terrestre ou por arqueólogos no começo de escavações. São também utilizados em navios, aviões ou até mesmo em aeroportos na detecção de armas entre os passageiros.

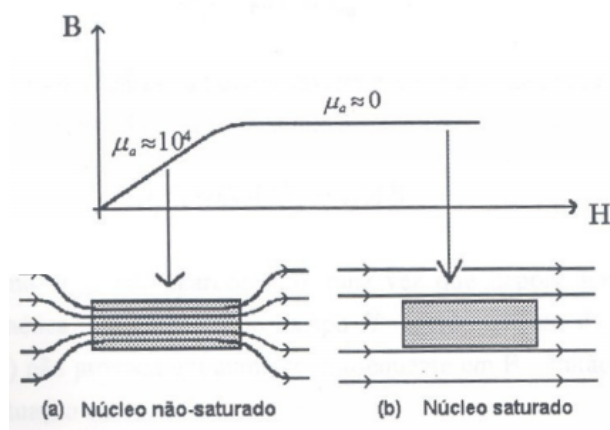
Existem vários tipos de sensores de campo magnético, sendo os mais conhecidos: os magnetómetros de núcleo saturado, *fluxgate* [5], magneto-resistência anisotrópica ou AMR (*Anisotropic Magnetoresistive*), precessão nuclear ou PPM [6], *superconducting quantum interference device* ou SQUID [7] e os de bombeamento óptico ou OPM [8]. Podemos começar por dividi-los em dois grupos: escalares e vectoriais. Os magnetómetros escalares são os PPM ou OPM e medem apenas a intensidade do campo magnético. Por outro lado, os magnetómetros vectoriais, como o *fluxgate* e o AMR, conseguem medir, separadamente, cada uma das componentes do campo magnético, bem como as suas intensidades.

No âmbito deste trabalho são utilizados dois tipos de magnetómetros: *fluxgate* e AMR. O primeiro, é um magnetómetro da *Stefan Mayer Instruments* [9] e é utilizado como magnetómetro de referência (MAG REF) na calibração dos magnetómetros da Lusospace (do tipo AMR), uma vez que já se encontra devidamente calibrado por uma entidade exterior à Lusospace e, por isso, são conhecidas as suas especificações (gama de medição, ortogonalidade, *offset*, linearidade, entre outros). O segundo magnetómetro utilizado é produzido pela Lusospace. A utilização de um magnetómetro de referência faz parte da estratégia adoptada pela Lusospace na calibração dos seus magnetómetros. O *fluxgate* é composto, essencialmente, por um núcleo de material ferromagnético, com elevada permeabilidade, e por duas bobinas que envolvem o núcleo (Figura III.1): a bobina de excitação, enrolamento primário, e a bobina de detecção como enrolamento secundário. O princípio básico de funcionamento do magnetómetro *fluxgate* consiste em fazer variar a permeabilidade do núcleo através de um campo magnético de excitação. Na bobina de excitação são induzidos pulsos periódicos de corrente que, consequentemente, geram um campo de excitação,  $H$ , e conduzem o núcleo à saturação magnética. Quando o núcleo atinge a

saturação, o fluxo magnético deixa de se concentrar no núcleo, seja qual for o campo a que é exposto (Figura II.2 - b). Por outro lado, quando o núcleo deixa o estado de saturação a intensidade do fluxo magnético varia e é gerada uma força electromotriz induzida na bobina de detecção (Figura II.2 - a). O sinal em tensão,  $V_{sec}$  na Figura II.1, gerado no enrolamento secundário é directamente influenciado pelo campo magnético externo [10].



**Figura II.1** - Composição de um magnetómetro do tipo fluxgate [11].

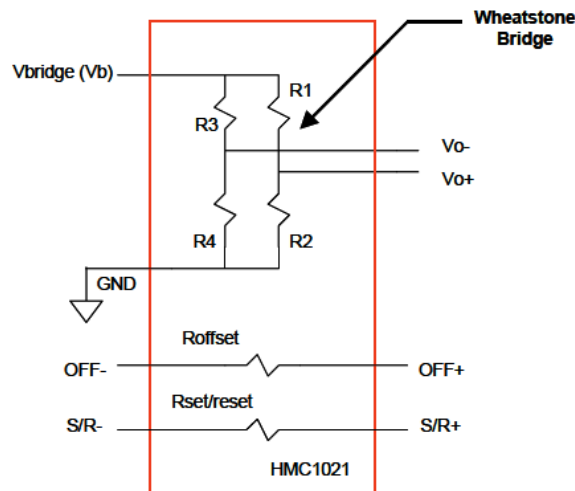


**Figura II.2** - Estados de saturação do núcleo. Quando o núcleo se encontra fora do estado de saturação existe variação da intensidade fluxo magnético no núcleo e é induzida uma força electromotriz. Por outro lado, quando o núcleo está saturado o fluxo deixa de se concentrar no núcleo, seja qual for o campo a que estiver exposto [10].

Na Lusospace são produzidos dois magnetómetros vectoriais do tipo AMR, sendo um alimentado por 28 V, que designamos por MAG28, e outro por 15 V, denominado MAG15. Como o próprio nome indica, sensores do tipo AMR são constituídos por componentes cuja resistência muda consoante o campo magnético incidente (magneto-resistivos) e cuja sensibilidade a esse mesmo campo depende do ângulo de incidência (anisotrópicos). No que toca à sua disposição dentro do sensor, os componentes assumem a forma de uma ponte Wheatstone, ou seja, comportam-se como quatro elementos magneto-resistivos, electrónica e fisicamente idênticos, para que reajam de forma idêntica ao campo magnético da vizinhança, e que entre si formam dois divisores de tensão em paralelo. Para fazer a detecção do campo magnético segundo os três eixos coordenados ortogonais, X, Y e Z, são necessárias três pontes de Wheatstone dentro do sensor, uma por cada eixo [4].



Quanto ao modo de funcionamento do sensor, numa situação ideal em que não existe campo magnético aplicado, as quatro resistências que constituem a ponte têm o mesmo valor e, nesse caso, o valor esperado de tensão à saída de cada divisor,  $V_{o-}$  e  $V_{o+}$  na Figura II.3, será o mesmo e será metade do valor total de tensão à entrada da ponte,  $V_b/2$ . Se, pelo contrário, existir a presença de um campo magnético uniforme o valor das resistências será diferente, o que faz com que a tensão à saída da ponte seja diferente do seu valor nominal [12].



**Figura II.3** - Esquema de uma ponte de Wheatstone de um sensor AMR utilizada na detecção do campo magnético [12].

O sinal em tensão à saída da ponte de Wheatstone é o que transporta informação sobre o campo magnético num determinado eixo. Por isso, deverá passar por um estágio de condicionamento de sinal (Figura II.4) antes de ser encaminhado para a saída efectiva do sensor. Neste estágio, o sinal à saída da ponte é elevado para um maior valor e, ainda, é estimado e removido o seu *offset*.



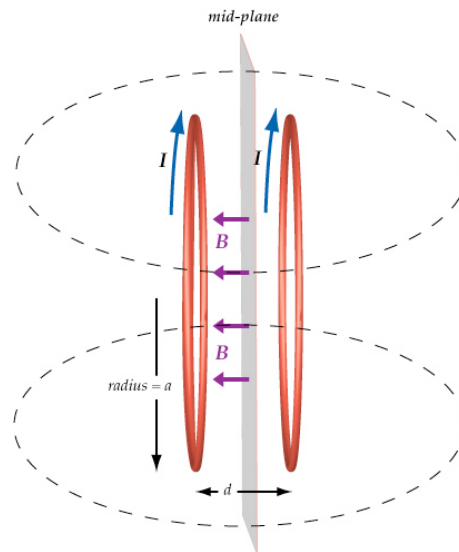
**Figura II.4** - Diagrama de blocos simplificado do magnetómetro da Lusospace.

Embora seja desejável trabalhar em condições ideais, a verdade é que raras são as vezes em que o conseguimos e uma das muitas razões para isso acontecer está nos sensores que medem grandezas no mundo real, pois não existe um sensor absolutamente preciso e são muitos os factores que influenciam a sua fiabilidade. Por exemplo no caso do sensor AMR, basta uma ligeira diferença entre resistências para que haja um *offset* no valor de tensão à saída da ponte de Wheatstone, o que não é benéfico pois este *offset* irá ser lido como sendo um campo magnético, que de facto não é, contribuindo para os erros associados ao sensor. Por conseguinte, é fundamental a calibração dos sensores para que as eventuais irregularidades possam ser minimizadas, garantido a qualidade do sensor. Para isso, faz-se uso de um sistema de Helmholtz.

## II.2.Sistema de Helmholtz

O sistema de Helmholtz é amplamente utilizado na calibração de magnetómetros pois permite simular campos magnéticos uniformes cuja intensidade e direcção são conhecidos e controlados, tornando-o, portanto, num sistema bastante fiável.

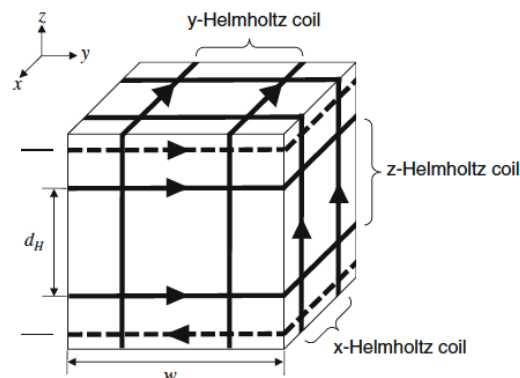
Na sua versão mais simples, o sistema de Helmholtz é constituído por duas bobinas circulares, de  $N$  espiras, com eixos alinhados e separados por uma distância igual ao raio dos espiras [13]. Estas bobinas são percorridas por uma corrente  $I$ , produzindo um campo magnético uniforme,  $B$ , no plano médio entre bobinas, Figura II.5.



**Figura II.5** - Esquema de um sistema de Helmholtz simples [14].

Acontece que esta arquitectura é, apenas, o ponto de partida para outras mais complexas e que exibem melhores resultados de campo magnético uniforme. De acordo com a literatura [15, 16], as bobinas circulares são mais resistentes, mais fáceis de enrolar e mais simples de analisar. Porém, as bobinas quadradas oferecem mais vantagens já que são mais fáceis de construir e, mais importante ainda, a área de campo magnético uniforme gerada é maior e mais adequada para testar equipamentos rectangulares, como os magnetómetros.

O sistema de Helmholtz que se encontra na Lusospace é compreendido por três pares de bobinas quadradas, cada uma com  $N=500$  espiras, aproximadamente 100 cm de lado e uma distância entre bobinas de 78 cm. Na Figura II.6 é apresentado o esquema deste mesmo sistema.

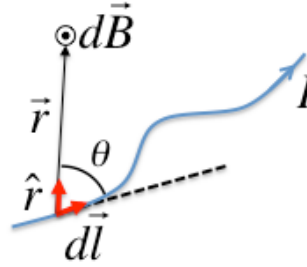


**Figura II.6** - Exemplo da arquitectura do sistema de Helmholtz da Lusospace [17].

No caso da bobina de Helmholtz da Lusospace, interessa estudar o campo que se encontra no seu centro geométrico, o centro do cubo, mas importa sobretudo saber o quão uniforme é o campo e até que distância entre bobinas. Para isso, recorre-se, primeiramente, à lei de Biot-Savat, dada pela equação II.1, e que é depois adaptada ao sistema de bobinas quadradas.

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (II.1)$$

Onde  $\mu_0$  é a permeabilidade do vácuo,  $I$  é a corrente eléctrica que percorre o comprimento infinitesimal do vector  $d\vec{l}$  de um elemento,  $\vec{r}$  é o vector com origem no elemento em questão e que termina no ponto onde se encontra o campo  $dB$  e  $r$  é o módulo de  $\vec{r}$ . (Figura II.7)



**Figura II.7** - Campo magnético gerado pela passagem de uma corrente eléctrica que passa por um elemento rectilíneo infinitesimal [18].

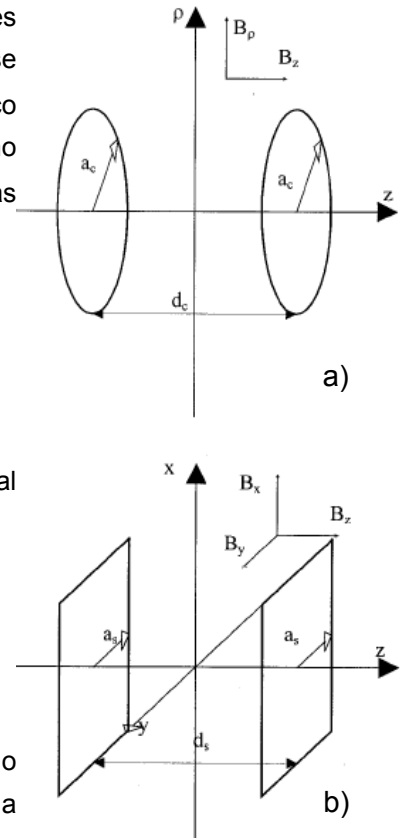
Considerando, agora, o esquema de bobinas circulares exemplificado na Figura II.5 e assumindo que os seus eixos se encontram alinhados com o eixo z de um referencial cilíndrico como o da Figura II.8 - a) e, ainda, cuja origem desse mesmo referencial se encontra no centro geométrico das duas bobinas circulares, recorrendo ao integral da equação II.1 temos:

$$B_z(0,0) = \frac{\mu_0 N I a^2}{\left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 + a^2 \right]^{3/2}} \quad (II.2)$$

Aplicando o raciocínio anterior e utilizando o referencial da Figura II.8 - b) obtém-se, para bobinas quadradas:

$$B_z(0,0,0) = \frac{\mu_0 N I 4 a^2}{\left[ \left( \frac{d}{2} \right)^2 + a^2 \right] \sqrt{2a^2 + \left( \frac{d}{2} \right)^2}} \quad (II.3)$$

Onde  $a$  corresponde ao raio na bobina circular e a metade do comprimento do lado, no caso da bobina quadrada.  $d$  é a distância entre centros geométricos das bobinas e  $N$  o número de espiras.



**Figura II.8** - Referencial cilíndrico para a) sistema de bobinas circulares. b) sistema de bobinas quadradas [19].

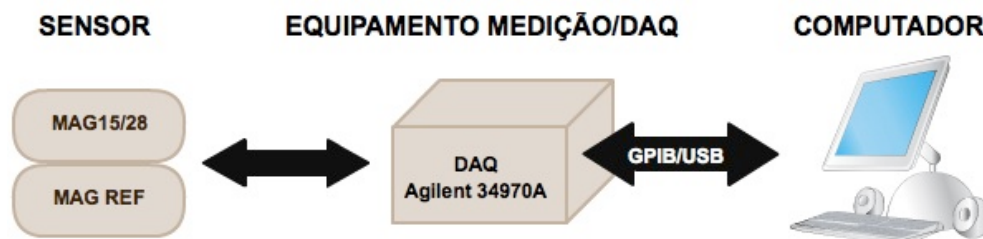
Estas aproximações à lei de Biot-Savat são possíveis porque, independentemente da forma das bobinas, na origem do referencial escolhido, apenas a componente  $z$  do campo magnético é diferente de zero [19].

Como se pode verificar nas equações anteriores (II.2,3), o campo varia em função de  $a$  e de  $d$ . Então, para alcançar um campo uniforme no centro das bobinas, deverá encontrar-se a melhor relação entre  $a$  e  $d$  que verifique as condições desejadas. No caso do sistema de Helmholtz existente na Lusospace, todo este estudo sobre as derivações da lei de Biot-Savat, bem como da determinação da melhor distância entre bobinas para obter o campo mais uniforme, foi feito aquando da sua construção.

### II.3.Sistema de calibração

Do sistema de calibração da Lusospace fazem parte sistema de aquisição de dados, o magnetómetro a ser calibrado, o magnetómetro de referência e o sistema de Helmholtz .

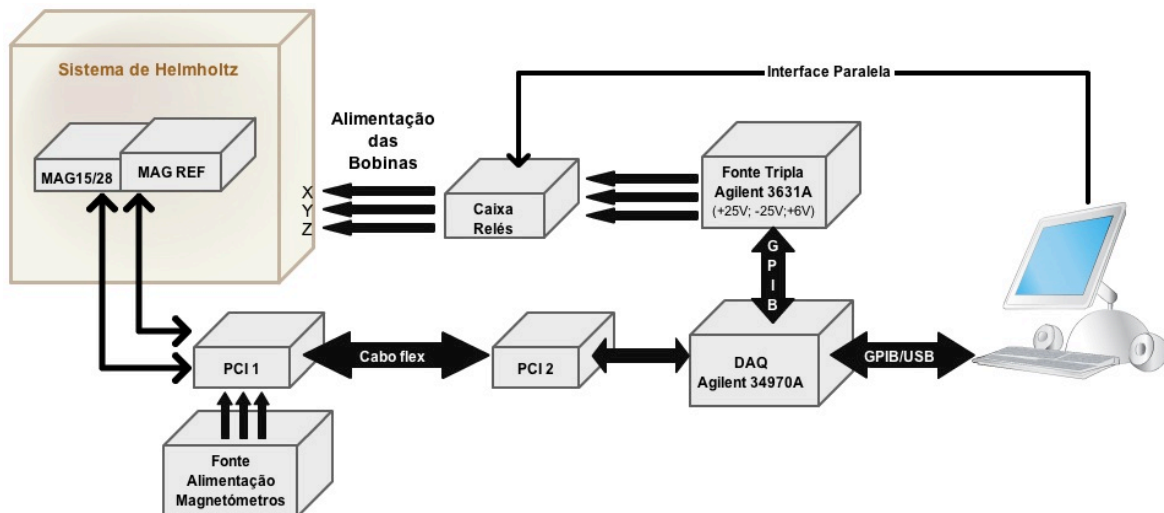
O sistema de aquisição de dados é um constituinte fundamental do sistema de calibração já que é este que permite fazer a ponte entre a grandeza física que se pretende medir, o campo magnético, e o computador, onde se faz a análise dos dados obtidos e o controlo dos equipamentos. Os elementos essenciais ao funcionamento do sistema são: o sensor, o equipamento de medição/DAQ o computador equipado com a ferramenta de *software* desenhada especificamente para o sistema. No caso deste projecto o diagrama funcional do sistema de aquisição seria o da Figura II.9.



**Figura II.9** - Diagrama funcional do sistema de aquisição de dados da Lusospace.

Todavia, a calibração de magnetómetros exige um sistema de aquisição mais complexo. Veja-se, a Figura II.10 onde se encontra esquematizada a arquitectura do actual sistema de calibração da Lusospace com os respectivos elementos que o constituem. Os magnetómetros, MAG15/28 são os sensores responsáveis por captar o campo magnético, gerado pelo sistema de Helmholtz, e converter essa informação num sinal eléctrico. A DAQ Agilent 34970A, por seu lado, recebe e processa os sinais provenientes dos sensores, o que pressupõe a conversão de sinais analógicos para digitais para que, posteriormente, sejam enviados através de um cabo GPIB/USB para o PC. Permite, ainda, a comunicação entre o PC e a fonte de alimentação tripla, Agilent 3631A que fornece, a partir das três saídas, a tensão que alimenta cada uma das bobinas de forma independente. O PC está equipado com o LabVIEW que possibilita a interacção do utilizador de forma centralizada com o sistema sendo possível, através do *software*, recolher, processar, tratar e armazenar dados. Bem como, controlar as referidas DAQ e fonte de alimentação e a caixa de relés que inverte o sentido da corrente nas bobinas permitindo, assim, gerar campo magnético nos dois sentidos de um dado eixo. Note-se que esta caixa de relés

comunica com o PC através da porta paralela e não por GPIB. Existe, ainda, uma segunda fonte de alimentação dedicada, exclusivamente, à alimentação dos magnetómetros. Na Figura II.10, *fonte alimentação magnetómetros*, não sendo, por isso, necessário fazer o seu controlo por computador. A unidade representada na Figura como *PCB 1*, no caso da calibração do MAG15, recolhe os dados provenientes dos dois magnetómetros e permite a sua alimentação. No caso da calibração do MAG28, apenas faz a recolha dos dados dos dois magnetómetro e a alimentação do MAG REF. Por último a *PCB 2* que, no caso da calibração do MAG15 apenas faz transporte de dados para a DAQ e, no caso da calibração do MAG28 faz o transporte dos dados para a DAQ e alimenta o MAG28.



**Figura II.10** - Esquema da arquitectura do actual sistema de calibração de magnetómetros utilizado na Lusospace.

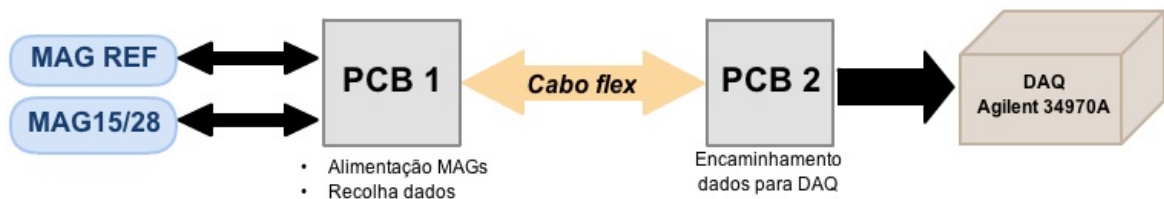
Seguem-se os requisitos básicos para o funcionamento deste sistema de calibração:

- ♦ **Gerar campo magnético uniforme segundo as componentes vectoriais X, Y e Z:** Este requisito obtém-se através do sistema de Helmholtz acima referido. Sistema este capaz de gerar um campo magnético uniforme no seu centro geométrico, onde são colocados os magnetómetros, graças ao seu sistema de bobinas de três eixos (X, Y e Z);
- ♦ **Fazer a compensação do campo magnético da Terra:** A compensação do campo é tratada como se se pretendesse retirar um *offset* de uma medida, ou seja, é feita através de uma primeira recolha dos valores, em tensão, do campo magnético medido pelo MAG REF, sem que as bobinas estejam alimentadas. Esse valor medido é invertido e é, posteriormente, subtraído a todas as medidas que se seguirem;
- ♦ **Medir o campo magnético total aplicado pelo sistema de Helmholtz:** Consegue-se medir o campo magnético total recorrendo à leitura dos valores de campo magnético medidos pelo MAG REF, uma vez que este corresponde a um magnetómetro já calibrado e cujos valores medidos são confiáveis;
- ♦ **Ser totalmente controlável por computador:** O controlo por computador é conseguido por meio do sistema de aquisição acima referido e que, de entre outros elementos, possui um computador equipado com o *LabVIEW* que permite ao utilizador monitorizar e controlar todo o sistema.



## Capítulo III - Reestruturação do sistema de calibração

Este trabalho vem, justamente, a propósito da necessidade de umentar a flexibilidade, otimizar e melhorar alguns constituintes do sistema de calibração da Lusospace. Por exemplo, para que o actual sistema esteja completo e pronto para proceder a uma calibração, tanto o magnetómetro a ser calibrado como o MAG REF têm de ser ligados a uma PCB que além de lhes fornecer a tensão necessária ao seu funcionamento, recolhe também a informação captada por eles. Depois, os dados recolhidos são enviados para uma segunda PCB que os transporta para a DAQ (Figura III.1). Além de não ser prático para a organização de um sistema existirem tantas interfaces entre equipamentos, também não é uma situação ideal do ponto de vista do sinal que é recolhido dos sensores, pois o excesso de módulos de interface pode comprometer a integridade, já que cada interface introduz ruído na comunicação. Outra não idealidade está no facto destas duas PCB serem obsoletas, as suas pistas já foram emendadas, algumas estão oxidadas ou mesmo interrompidas, a blindagem contra o ruído electrónico é inexistente e a própria arquitectura das placas não cumpre os requisitos em termos da estabilidade do sinal. Além da substituição das PCB, também o cabo *flex* que liga a PCB à DAQ deverá ser substituído uma vez que, no contexto em que está a ser utilizado, também ele poderá comprometer a integridade do sinal.



**Figura III.1** - Esquema simplificado da interface MAGs/PCB/DAQ.

Quanto ao actual programa desenvolvido em *LabVIEW*, será substituído por um que cumpra os requisitos suficientes a uma calibração, como o controlo da fonte que alimenta as bobinas, compensação do *offset* do campo envolvente, aquisição e tratamento dos dados recolhidos dos magnetómetros, entre outros requisitos, detalhados ao longo do capítulo IV.3. Com a restrição das funcionalidades do programa às estritamente necessárias a uma calibração, é possível otimizar o seu desempenho. Para facilitar a comunicação com o PC e, consequentemente, com o *LabVIEW*, o cabo de ligação da porta paralela que liga a caixa de relés ao PC será parcialmente substituído por um microcontrolador *Arduino* que é ligado através de USB.

Em suma, foram feitas duas grandes alterações: uma no *hardware* e outra no *software*. Quanto ao *Hardware*, a melhor solução foi criar um módulo de aquisição, composto por uma única PCB, que incorporou as funções das actuais PCBs acima mencionadas. Contudo, e dado que o MAG28 é alimentado por uma tensão diferente do MAG15 e do MAG REF, foram projectados dois módulos de aquisição, um para o MAG15 e outro para o MAG28, sendo que o deste último incorpora, na PCB, um regulador de tensão que permite baixar a tensão de entrada de 28 até 15 V, para que o MAG REF possa ser alimentado.

Para o desenho das PCBs utilizou-se um programa que satisfaz os requisitos exigidos e que apresentou uma maior compatibilidade na hora de escolher um serviço de impressão de PCB.

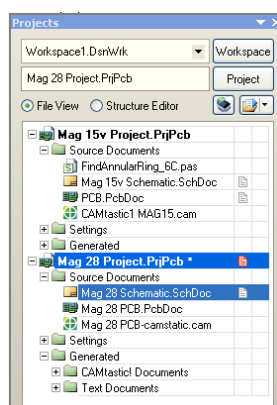
O programa que melhor satisfaz estes requisitos é o *Altium Designer* e o serviço de impressão a *Eurocircuits*. No que diz respeito ao *software*, a estratégia passou por desenvolver um programa versátil, que tornasse o processo de calibração mais simples e, também, mais eficiente em termos computacionais. Adicionalmente, pretende-se que a interface do utilizador lhe conceda um maior controlo, nomeadamente, sobre os parâmetros dos magnetómetros, do sistema de Helmholtz e dos canais de aquisição. O programa utilizado foi, novamente, o *LabVIEW*.

Neste trabalho já foi referida várias vezes a importância de construir magnetómetros que retornam medidas exactas, dada a exigência das aplicações espaciais para que foram projectados e, para isso, contribuem fortemente os seus sistemas de calibração. É, então, fundamental garantir que todos os elementos que compõem o sistema de calibração sejam projectados e posteriormente construídos com o maior rigor, por forma a minimizar ruídos electrónicos, ruídos externos, excesso de cablagem e interfaces entre equipamentos e, também, por forma a tornar o sistema resiliente a falhas.

### III.1.Desenho das Placas de Circuito Impresso (PCB)

O *Altium Designer* é um *software* que integra todas as ferramentas necessárias ao desenvolvimento de um produto em electrónica desde o esquemático, simulação de circuitos, análise de sinais ao desenho de PCBs.

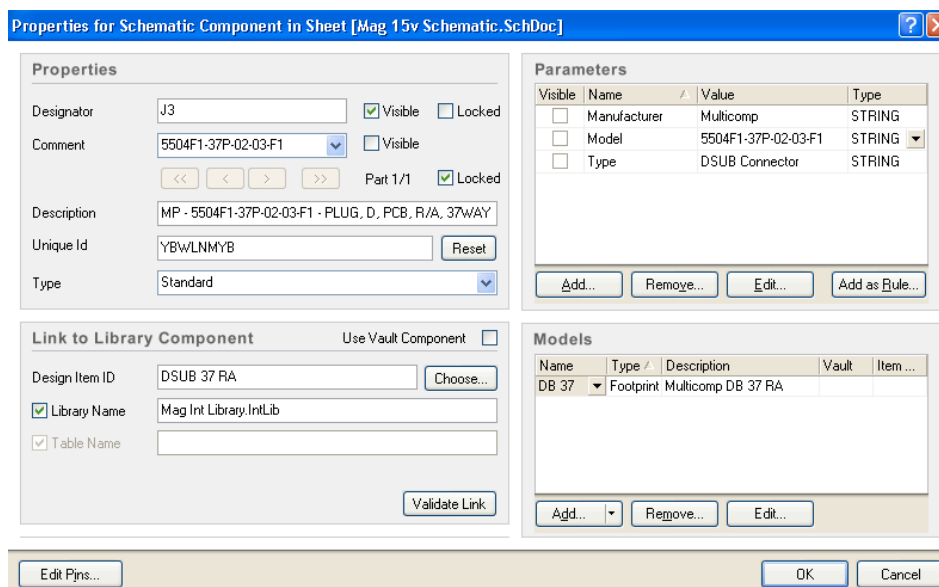
A base do processo de desenho de um produto, neste caso uma PCB, é o projecto. No *Altium*, a criação de um novo projecto de PCB permite agrupar todos os ficheiros e pastas necessários à sua construção numa só pasta e segundo uma hierarquia lógica, facilitando a organização de todo o trabalho (Figura III.2). Alguns ficheiros e pastas que incorporam o projecto de uma PCB são, por exemplo, o do esquemático do circuito (*Schematic.SchDoc*), o do desenho da PCB (*PCB.PcbDoc*), a biblioteca de componentes, os arquivos *Gerber* e os de furação.



**Figura III.2** - Estrutura da organização dos projectos criados para a construção dos módulos de aquisição do MAG15 e MAG28.

Um dos pontos fortes do *Altium* é a sua biblioteca que dispõe de centenas de modelos de componentes (conectores, interruptores, díodos, resistências, etc.), dos mais variados fabricantes, na qual é guardada informação sobre os símbolos dos componentes que figuram no esquemático, os seus modelos de *footprint* que integram o desenho da PCB, especificações técnicas do componente, referência, informação sobre o fabricante. Outra grande vantagem é a possibilidade de ser o próprio utilizador a criar e adicionar bibliotecas de componentes desenhados por ele.





**Figura III.3** - Janela de propriedades do conector DB37 da Multicomp criada pelo utilizador e pertencente à biblioteca Mag Int Library.IntLib.

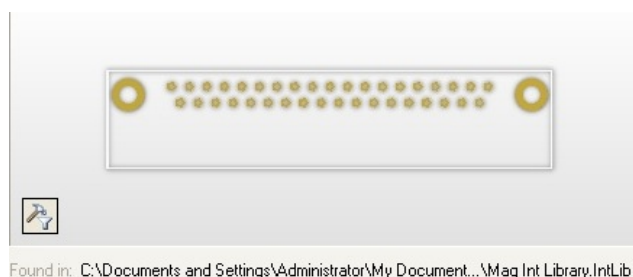
No ficheiro do esquemático, são dispostos os desenhos dos componentes e são feitas as respectivas ligações eléctricas, por via de um simples traço, essenciais à formação do circuito eléctrico. Nesta fase ainda não existe a necessidade das dimensões dos desenhos serem uma representação fiel das dimensões dos componentes. Agora, é essencial transferir a informação do esquemático para o *layout* da placa, presente no ficheiro de desenho da PCB. Para isso existe uma função, *Update PCB*, no menu *Design*.

Feito isto, tem-se um novo tipo de ficheiro, o da PCB, onde figura a representação real das dimensões da placa, que pode ser desenhada recorrendo a um *software* de desenho técnico como o *AutoCAD* ou *SolidWorks* e que é, depois, exportada para o *Altium*. Além das dimensões da placa, também as dimensões da base dos componentes, *footprint*, que assentarão na placa devem de ser desenhadas de acordo com o seu tamanho real. As várias camadas que compõem a PCB, as pistas, vias, *pads*, *etc.*, são desenhadas respeitando as regras de desenho de PCB definidas pela *Eurocircuits*.

No fim, pretender-se-á enviar a PCB projectada para o fabricante. Para isso, todas as informações sobre a PCB como imagens e dimensões das camadas, dos componentes, desenho e dimensões das pistas ou furação existente, terão de ser guardados num formato que seja reconhecido pela máquina que fará a impressão e furação da placa. No *Altium* existe uma opção, *Fabrication Outputs/Gerber Files*, que permite criar arquivos *gerber* e *drill*. Arquivos do tipo *gerber* são um formato padrão da indústria de PCBs, e neles são guardados ficheiros com informações sobre cada camada que constitui a PCB. Quanto ao arquivo *drill*, este contém informação sobre tipos de furo e locais de furação da PCB e é utilizado por máquinas de CNC. O resultado final será uma placa robusta, isolada electricamente e que é composta por um laminado de fibra de vidro onde, depois, é depositada uma fina camada de cobre que corresponderá ao circuito eléctrico desenhado, tipicamente 0.035mm [20]. Além disto, a placa é, ainda, sujeita a um processo de acabamento, no qual se protege o cobre da sua oxidação natural, depositando sobre ele uma camada de resina *epoxy*, denominada *soldermask*.

### III.1.1. Módulo de aquisição do MAG15

Antes de dar início ao desenho da PCB foi feito um levantamento do número e do tipo de conectores e componentes necessários para o módulo de aquisição de cada magnetómetro, do número de entradas de alimentação da PCB, do *pin-out* do conector do MAG15, MAG28 e do MAG REF e do *pin-out* do conector que reunirá informação dos dois magnetómetros para, depois, a enviar para o equipamento de medição. O modelo de conectores escolhidos não fazia parte de nenhuma das bibliotecas existentes no *Altium*, foi então criada a biblioteca *Mag Int Library.IntLib* onde, recorrendo ao *datasheet* de cada conector, foram adicionados os desenhos à escala do esquemático e *footprint* de cada componente.



**Figura III.4** - Footprint do conector DB37 da Multicom desenhado de raiz no *Altium* e adicionado à nova biblioteca *Mag Int Library.IntLib*.

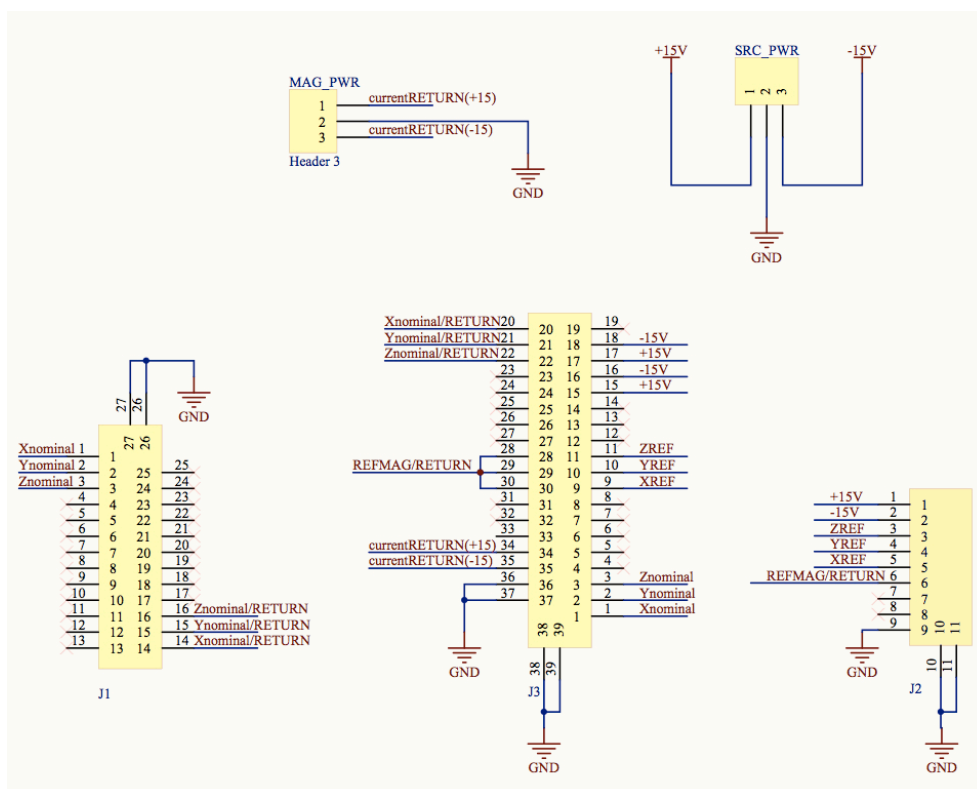
Para o módulo de aquisição do MAG15 utilizaram-se: um conector DB9, um conector DB25, um conector DB37 e seis fichas de alimentação. O conector DB9 permite a comunicação com o MAG REF, o DB25 com o MAG15 e o DB37 reúne a informação proveniente dos pinos dos dois conectores anteriores e que é, posteriormente enviada, por via de um cabo, para a DAQ.

**Tabela III.1** - Pin-out correspondente ao conector a) DB25 do MAG15; b) DB9 do MAG REF

MAG15/DB25		MAG REF/DB9	
Pin	Descrição	Pin	Descrição
1	X nominal	1	+15 V
2	Y nominal	2	-15 V
3	Z nominal	3	Z REF
4 a 13	Não Ligado	4	Y REF
14	X nominal/Return	5	X REF
15	Y nominal/Return	6	REF Return
16	Z nominal/Return	7 e 8	Não Ligado
17 a 25	Não Ligado	9	Ground

Após o levantamento dos dados acima referidos e da definição do *pin-out* de cada conector, deu-se início ao projecto de criação do módulo de aquisição do MAG15, *Mag 15v Project.PrjPcb*.

Na Figura III.5 está representado o diagrama esquemático, completo, do circuito eléctrico, onde é possível confirmar o *pin* e a correspondente descrição enunciados na Tabela III.1 sendo que, aos conectores J1, J2 e J3 da figura correspondem, respectivamente, os conectores DB25, DB9 e DB37. Olhando para a figura não parece haver qualquer ligação eléctrica entre componentes por não existirem traços/fios que os interliguem. O *Altium* dá ao utilizador a liberdade de optar por criar *nets*, nomeá-las e, de seguida, atribuí-las aos pinos em vez da tradicional ligação por via de um traço. Veja-se na mesma figura, por exemplo, o pino 1 do conector J1. À entrada existe uma *net* com o nome *Xnominal*. Agora, repare-se no pino 1 do conector J3. Na sua entrada existe uma *net* com o mesmo nome, isto significa que o pino 1 do conector J1 está ligado, por via da *net Xnominal*, ao pino 1 do conector J3. A mesma regra é aplicada aos restantes pinos dos conectores, o que garante a organização do esquemático, a verificação de ligações e ajuda, igualmente, na sua compreensão. Está também presente no esquemático o bloco *SRC\_PWR*, composto por três *nets*, +15 V, GND e -15 V, que irão alimentar o MAG15 e o MAG REF. Note-se, contudo, que estas *nets* são ligadas directamente aos pinos 1 e 2 do conector J2(MAG REF), mas não são ligadas a nenhum pino do conector J1(MAG15), o que significa que o MAG REF é alimentado directamente e o MAG15 não. Esta diferença na alimentação dos magnetómetros acontece porque se pretende saber a potência consumida pelo MAG15 e, para isso, é necessário saber quais são os valores de corrente que estão a ser exigidos pelo MAG15 à fonte de alimentação dos magnetómetros. A determinação destes valores é feita através da DAQ, já que esta permite a leitura de sinais em tensão e em corrente. Assim sendo, os sinais das *nets* +15V e -15V, provenientes do bloco *SRC\_PWR*, são encaminhados, respectivamente, para os pinos 15 e 16 do conector J3, que faz a comunicação com a DAQ que, por sua vez, faz a leitura da corrente dos sinais e retorna o seu valor para os pinos 34 e 35 que, posteriormente, os encaminham para os pinos 1 e 3 do bloco *MAG\_PWR* que, finalmente, alimenta o MAG15.



**Figura III.5 - Esquemático do circuito eléctrico do módulo de aquisição do MAG15.**

Terminado o esquemático, fez-se a compilação do seu ficheiro e a actualização do ficheiro da PCB. Agora, o ficheiro *PCB.PcbDoc* está pronto para ser utilizado, já que todas as ligações eléctricas foram importadas do esquemático e representam-se, aqui, por linhas guia. Entretanto, antes de dar início à segunda fase do projecto, foi delineada uma estratégia para o desenho da arquitectura da placa e que inclui:

- ◆ Modelo *STEP* a 3D da placa - disponibilizado pela Lusospace e desenhado em *SolidWorks*, tendo em conta as dimensões que constam do *datasheet* da caixa onde a placa será colocada;
- ◆ Número de camadas da PCB;
- ◆ Plano de *ground* - contribui para o aumento resistência da placa e reduz a condução e irradiação de ruídos;
- ◆ Disposição dos componentes;
- ◆ Dimensão das pistas;
- ◆ Espaçamento entre pistas - deve ser razoável para evitar que se afectem, mutuamente;
- ◆ Os ângulos das pistas - quando necessários devem ser arredondados e de 45° para evitar reflexões de sinal.

Com o intuito de minimizar alguns aspectos acima mencionados e de seguir as directrizes da *Eurocircuits* no que toca ao fabrico de PCBs, foram introduzidas no *Altium*, através da opção *Design/Rules*, que consta no menu do ficheiro *\*.PcbDoc*, as regras para as dimensões de pistas, vias, *pads*, espaçamentos entre pistas e ângulos. Regras estas retiradas do *site* da *Eurocircuits* [21].

Posto isto, fez-se a importação do ficheiro *SolidWorks* que contém o *STEP* a três dimensões da placa, definiram-se duas camadas de sinal para a PCB, a *Top* e a *Bottom* e que revelaram ser suficientes, dado o número de ligações existentes. Além das camadas de sinal foram definidas, automaticamente, camadas como a *Top* e *Bottom Overlay*, que incorporam os *footprint*, identificação dos componentes e eventuais legendas que o utilizador queira introduzir na placa e, também, as camadas *Top* e *Bottom soldermask* que revestem e protegem o cobre da oxidação. Depois, definiu-se um plano de massa que abrange toda a área da PCB, colocaram-se os *footprints* dos componentes segundo a melhor disposição e por forma a facilitar ligações e, por último, desenharam-se as pistas.

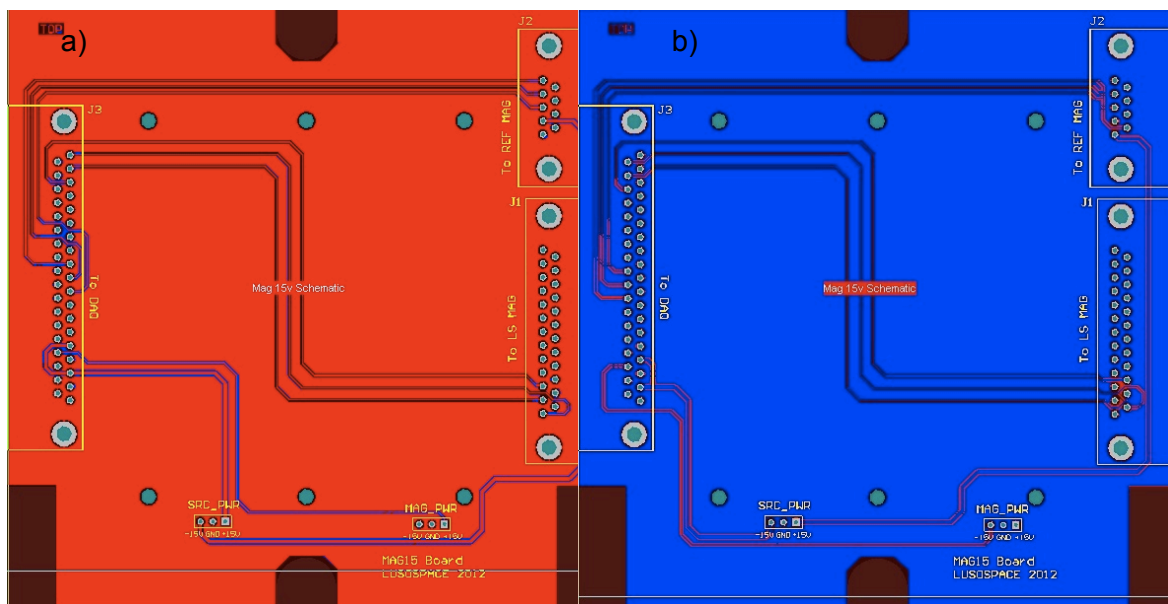


Figura III.6 - a) Camada Top da PCB; b) Camada Bottom.

Através da Figura III.6 é possível comparar as duas camadas que compõem a PCB, confirmar as ligações entre componentes do circuito, através das pistas numa e noutra camada, verificar os furos (círculos a verde) que serão feitos na placa para servir de encaixe aos componentes e respectivos pinos e para fixar a placa à caixa através de parafusos. Também é possível confirmar os *footprints* e a respectiva identificação e função do componente (linhas e letras a amarelo) que serão desenhados na PCB para que o utilizador saiba que componente fixar e em que sítio da placa.

Por fim, geraram-se e enviaram-se para a *Eurocircuits* os arquivos *drill* e *gerber* que compõem a PCB.

Como se pode confirmar na Figura III.7, foram gerados sete ficheiros *gerber*, *PCB.GXX*, um por cada uma das seis camadas acima mencionadas e que, efectivamente, compõem a PCB do módulo de aquisição do MAG15 e um outro, *PCB.GM2*, que não corresponde a uma camada, mas ao *outline* da placa. Quanto aos ficheiros *\*.TXT* e *\*.DRL*, estes correspondem a ficheiros de furação, *drill*.

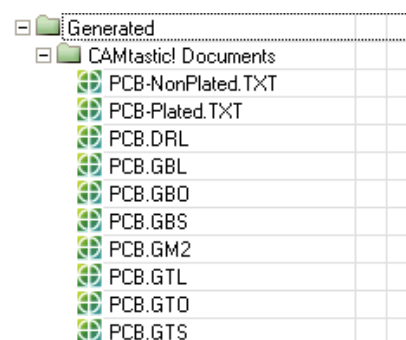
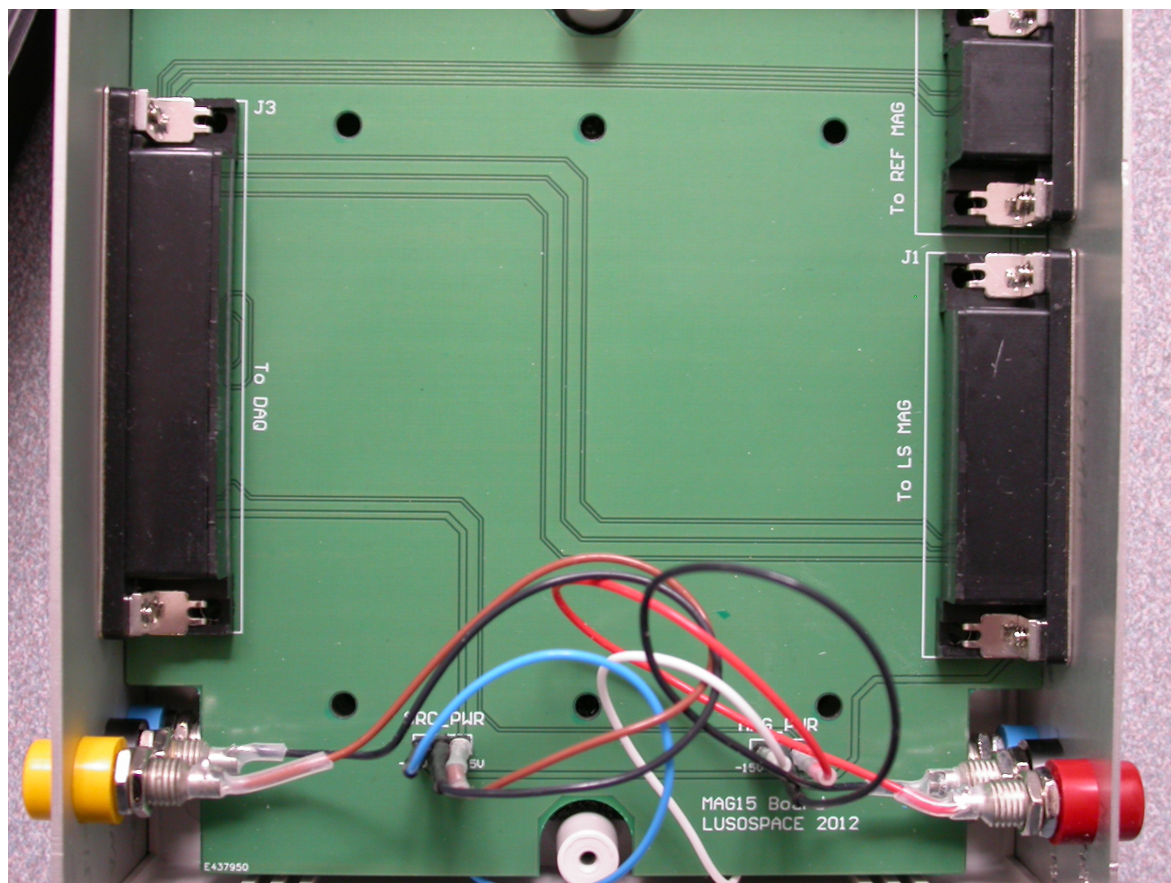


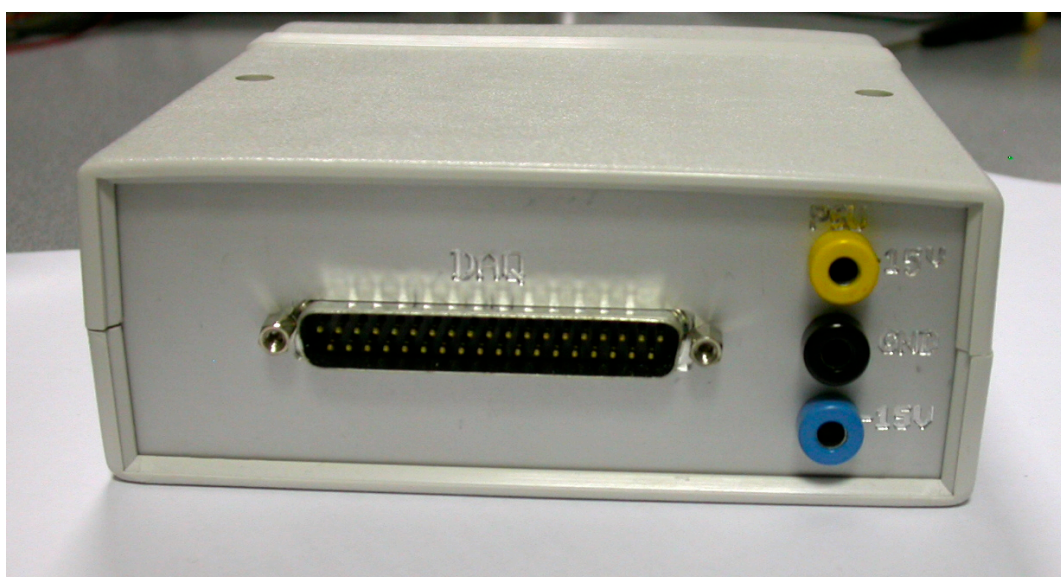
Figura III.7 - Lista dos ficheiros drill e gerber gerados a partir do Altium.



A PCB fabricada (Figura III.8) foi colocada numa caixa (Figura III.9), previamente encomendada, cujas faces que a compunham foram substituídas por duas faces metálicas, desenhadas em *AutoCAD*, e, posteriormente, cortadas na máquina *Bungard CNC*, que existe no laboratório de instrumentação do departamento de física, *FCT/UNL*. Além do corte das placas metálicas, também se aproveitou a CNC para identificar, na placa, os elementos que serão ligados ao módulo.



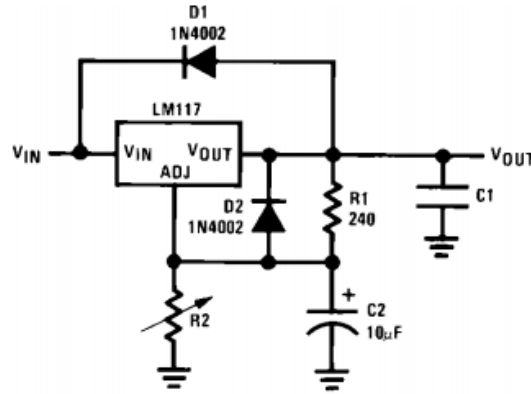
**Figura III.8** - Aspecto final da PCB após a soldadura de todos os componentes.



**Figura III.9** - Caixa e respectiva PCB, cujas faces foram cortadas com recurso a uma CNC, e que compõe o módulo de aquisição do MAG15. Identificação dos elementos que são ligados a esta face: DAQ e PSU-Power Supply Unit com +15 e -15V e ground.

### III.1.2. Módulo de aquisição do MAG28

O princípio de funcionamento do módulo de aquisição do MAG28 é em tudo semelhante ao do MAG15 e uma das funções destes módulos é, precisamente, alimentar o magnetómetro de referência e o magnetómetro a ser calibrado, seja ele o MAG15 ou o MAG28. Sendo assim, uma vez que a tensão de alimentação do MAG28 é de 28 V e a do MAG REF é de 15 V, e existindo apenas uma fonte de alimentação para alimentar os dois magnetómetros, utilizou-se um regulador de tensão que permite baixar a tensão de entrada dos 28 até aos 15 V, tensão esta que alimentará o MAG REF. A ideia base para a arquitectura deste regulador de tensão foi retirada do *datasheet* de um dos elementos que o compõem, o regulador LM117 [22], e encontra-se na Figura III.10.



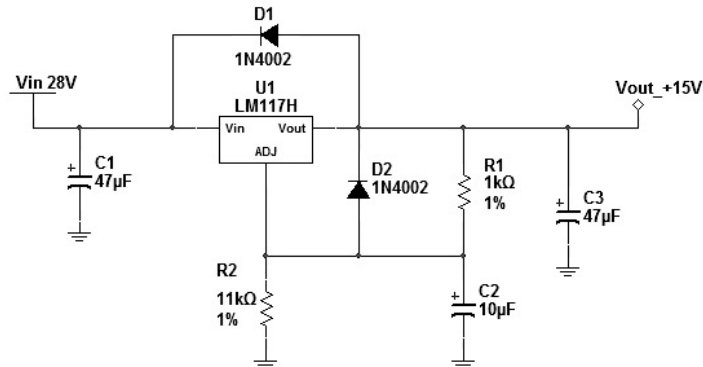
**Figura III.10** - Exemplo do circuito do regulador LM117 presente no *datasheet* e que foi usado como base no dimensionamento do circuito do regulador de tensão do módulo de aquisição do MAG15 [22].

Dadas as exigências de alimentação dos magnetómetros, e com a ajuda da expressão que se segue, foram feitas algumas adaptações ao circuito da Figura III.10.

$$V_{out} = V_{ref} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} R_2 \quad (IV.1)[22]$$

Onde  $V_{out}$  é a tensão pretendida à saída, neste caso 15 V,  $V_{ref}$  a tensão de referência e  $I_{ADJ}$  a corrente à saída do terminal *ADJ* do regulador e que, segundo [22], correspondem, respectivamente, a 1.25 V e 100  $\mu A$ .

Fixando  $R_1 = 1k\Omega$  e substituindo as restantes variáveis pelos valores acima referidos, obtém-se:  $R_2 \approx 11k\Omega$ . Atribuindo, agora,  $C_1 = 47\mu F$  e acrescentando  $C_3 = 47\mu F$ , vem:



**Figura III.11** - Circuito final do regulador de tensão incorporado no módulo de aquisição do MAG28.

Terminado o dimensionamento do circuito do regulador de tensão que foi incorporado no módulo de aquisição do MAG28, deu-se início ao projecto de desenho da PCB no *software Altium*. Para tal, recorreu-se, mais uma vez, ao levantamento da lista de componentes a serem utilizados no correspondente módulo de aquisição, bem como ao *pin-out* de cada conector, adaptado ao novo magnetómetro e que se encontra no apêndice A. No que diz respeito ao processo de desenho da PCB neste módulo, é baseado nas mesmas etapas, técnicas e regras adoptadas para o módulo de aquisição anterior. E, além disto, também os requisitos são os mesmos. À excepção de que, neste módulo, se pretende obter a leitura de mais cinco sinais do que no anterior.

Na Figura III.12 está representado o diagrama esquemático do módulo de aquisição do MAG28, *Mag 28 Schematic.SchDoc*. Como se pode verificar, à excepção do circuito do regulador de tensão, este esquemático é composto pelo mesmo tipo e número de componentes do esquemático do MAG15, Figura III.5. A diferença encontra-se, apenas, no número de sinais que se pretende adquirir com este módulo de aquisição e, por conseguinte, no número de ligações existente em cada componente e entre componentes. Veja-se o conector J1 do esquemático, que corresponde ao conector DB25 do MAG28. Neste conector estão ligados mais cinco pinos de sinal do que no do MAG15 e que são: *X, Y e Z redundant, Therm1 e Therm2*. Os três primeiros não são mais do que uma réplica dos sinais *X, Y e Z nominal* que estão ligados, respectivamente, aos pinos 1, 2 e 3 deste mesmo conector. Os sinais denominados *Therm1 e Therm2* correspondem ao sinal de dois termístores, dos quais se pretendem obter valores de temperatura. O conector J2 corresponde ao conector DB37 que fará a ligação com a DAQ. A este conector apenas são acrescentadas as ligações necessárias para fazer a leitura, posterior, dos novos sinais. Quanto ao conector J3, que por sua vez corresponde ao conector DB9 do MAG REF, não são feitas quaisquer alterações. Por último, temos os blocos *SRC\_PWR1* e *MAG\_PWR1*, responsáveis pela alimentação do MAG28 e do MAG REF. Note-se, ainda, que a alimentação dos magnetómetros é feita de forma directa para o MAG REF e de forma indirecta para o MAG28, tal como acontece no módulo de aquisição do MAG15. É, ainda, de realçar que os pinos 26 e 27 do conector J1, 38 e 39 do J2 e 10 e 11 do J3, não correspondem a pinos de sinal, mas sim aos furos onde assentam os encaixes dos componentes e que estão ligados ao plano de massa para minimizar ruídos.



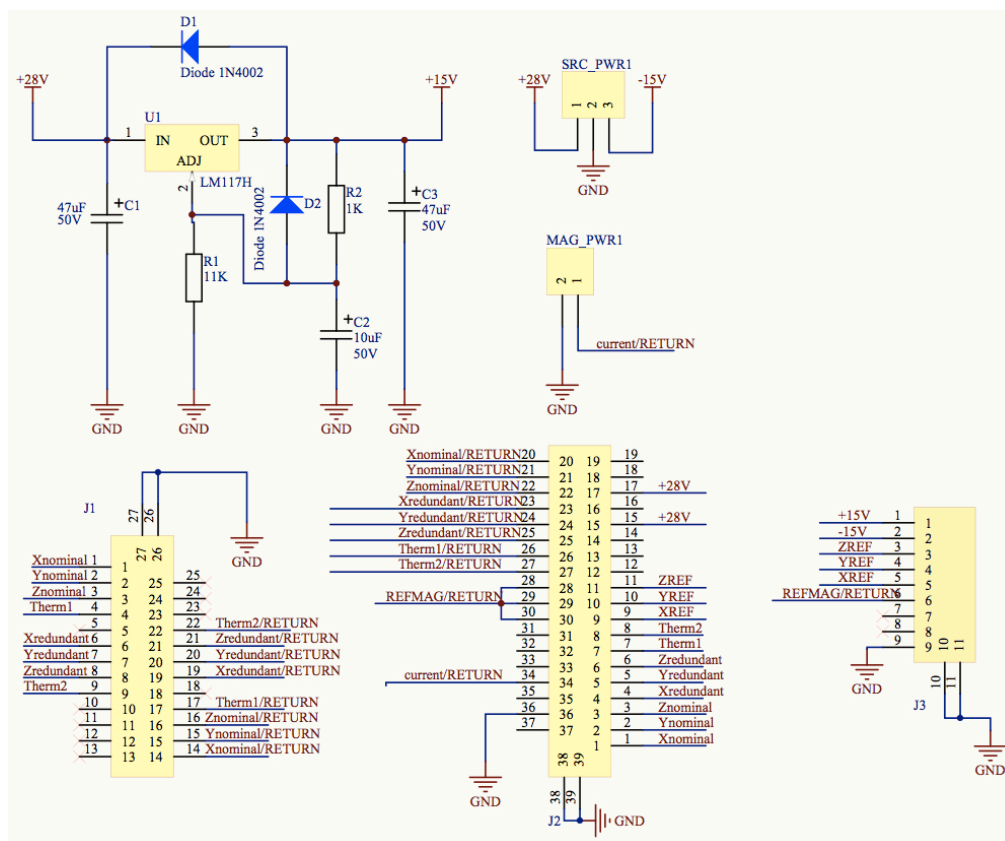


Figura III.12 - Esquemático do circuito eléctrico do módulo de aquisição do MAG28.

Terminado o esquemático, criou-se o ficheiro *Mag 28 PCB.PcbDoc*, importou-se, novamente, o STEP da placa a 3D do *SolidWorks*, definiram-se as mesmas camadas de sinal para a PCB, a *Top* e a *Bottom* e, além destas, ficaram definidas, também, as camadas *Top* e *Bottom Overlay*, *Top* e *Bottom soldermask*. Definiu-se o plano de *ground* que abrange toda a área da PCB, colocaram-se os *footprints* dos componentes segundo a melhor disposição e por forma a facilitar ligações e, por último, desenharam-se as pistas. Tudo isto seguindo as directrizes da *Eurocircuits*, no que diz respeito ao desenho de PCBs [21].

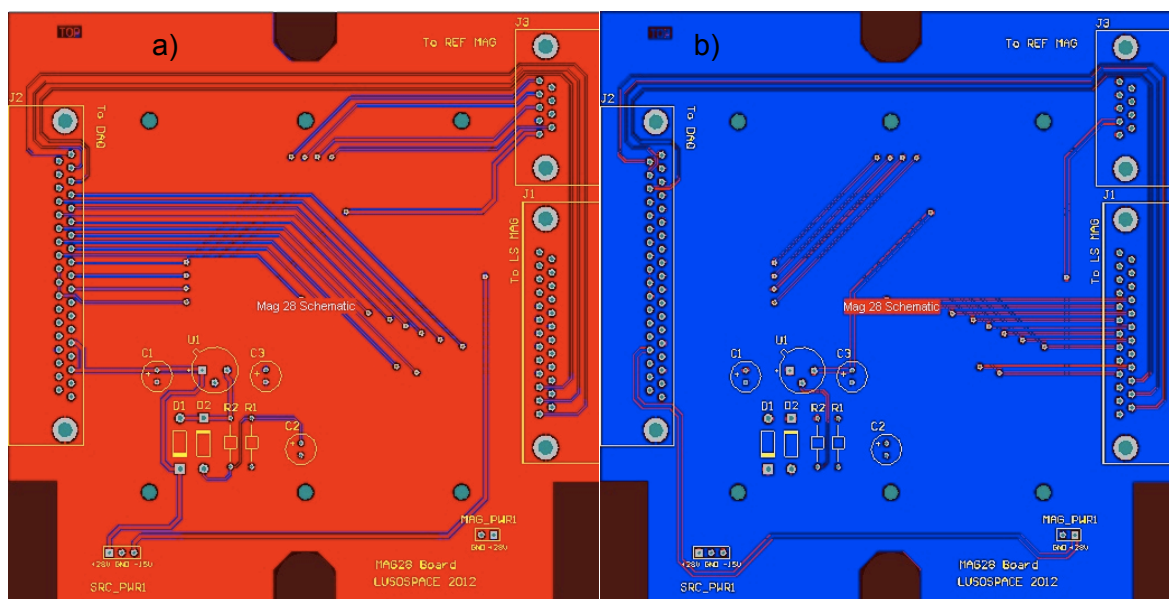
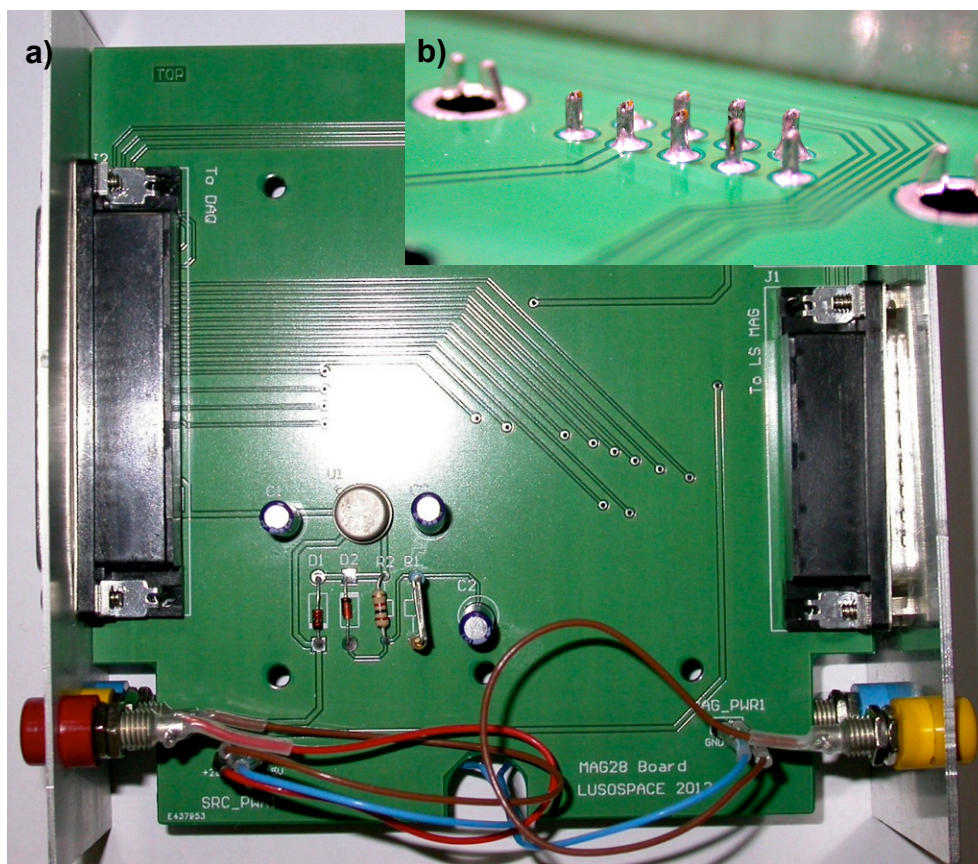


Figura IV.13 - Camada a) Top b) Bottom da PCB.

As Figuras III.13 - a) e b) representam, respectivamente, as camadas *Top* e *Bottom* da PCB desenhada para o módulo de aquisição do MAG28. Como se pode conferir, esta PCB apresenta alguma complexidade em relação à do módulo anterior. Isto deve-se, não só ao circuito do regulador de tensão, mas também ao elevado número de ligações entre componentes, ligações essas que não foi possível manter na mesma camada sendo, por isso, necessário recorrer a vias que, basicamente, consistem em túneis que transportam o sinal de uma camada para a outra da PCB.

À fase de desenho da PCB seguiu-se a da geração dos arquivos *drill* e *gerber*. O aspecto final desta PCB, após o fabrico e respectiva soldadura dos componentes, está representado na Figura III.14. Da mesma forma que a anterior, esta PCB também foi colocada numa caixa, formando, assim, o módulo de aquisição do MAG28.



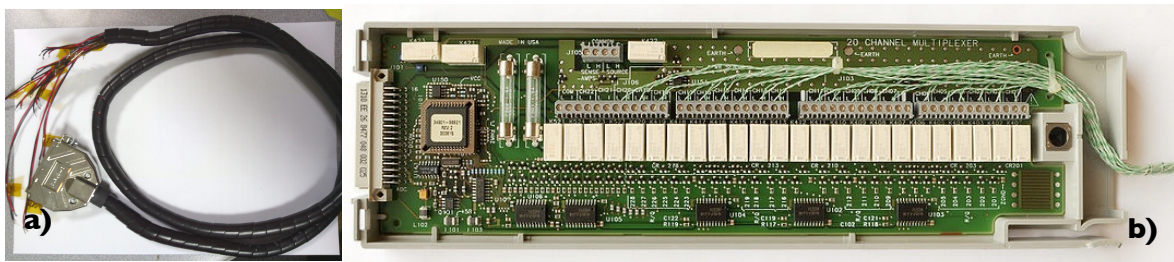
**Figura III.14** - a) Aspecto final da PCB do módulo de aquisição do MAG28 com os respectivos componentes. b) Vista da soldadura do conector DB9.



**Figura III.15** - Exemplo de uma das faces de um módulo de aquisição à qual são ligados os cabos de sinal do MAG15/28 e do MAG REF e os de alimentação do MAG15/28.

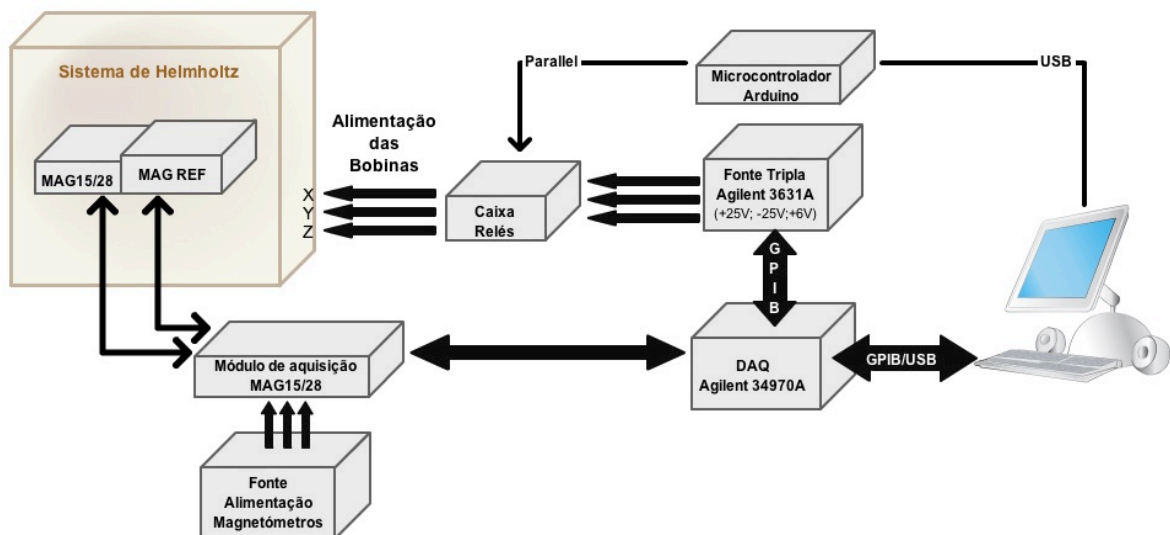
### III.2.Integração do novo hardware

A DAQ Agilent 34970A é composta por três *slots* (com endereços de memórias 100, 200 e 300) onde em cada *slot* é possível armazenar uma carta. Neste caso, a carta utilizada é uma Agilent 34901A com 22 canais de aquisição, sendo dois deles específicos para leituras de corrente. Os sinais antes de chegarem a esta carta faziam o percurso PCB 1/cabo *flex*/PCB 2 (Figura III.1). Agora, com a reestruturação feita ao *hardware*, que inclui a substituição das PCB 1 e 2 e do cabo *flex*, os sinais são transportados dos sensores para uma única PCB e são, depois, encaminhados para a referida carta da DAQ por via de um novo cabo. Este novo cabo é composto por um conjunto de fios que foram, numa extremidade, soldados a um conector DB37 (Figura III.16- a) e, na outra extremidade, foram ligados directamente a cada um dos canais da referida carta (Figura III.16- b).



**Figura III.16** - a) Cabo que liga o módulo de aquisição à carta da DAQ. b) Ligações dos sinais provenientes de um módulo de aquisição aos canais da carta Agilent 34901A [23].

Concluída a primeira parte da reestruturação e aperfeiçoamento do sistema de calibração, a do *hardware*, importa agora conhecer como se estrutura a melhorada arquitectura do sistema de calibração, para depois dar início à segunda parte da reestruturação deste sistema, a do *software*.



**Figura III.17** - Arquitectura completa do sistema de calibração da Lusospace após reestruturação no *hardware*.

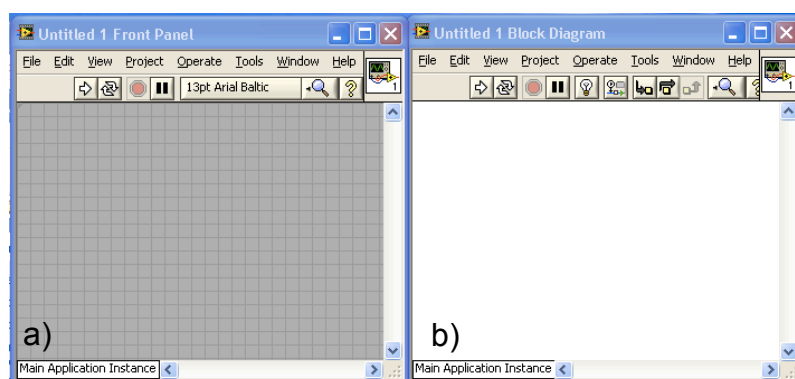


### III.3.Desenvolvimento de ferramentas em *LabVIEW*

O *LabVIEW* é uma ferramenta de programação baseada em linguagem gráfica G que, ao contrário de outras programações, utiliza simbologia gráfica para criar um programa e o seu código assemelha-se a um fluxograma, fazendo com que a sua execução se faça segundo o fluxo de dados e não segundo instruções. É portanto uma ferramenta que facilita o controlo e aquisição de dados de instrumentos, fazendo uso de sistemas de aquisição. Além disto, o *LabVIEW* também processa e analisa os dados, revelando-se uma ferramenta essencial, por exemplo, na interacção e controlo de grandezas físicas como o campo magnético. O reconhecimento dos equipamentos, que compõem os sistemas de aquisição, por parte do *LabVIEW* é possível instalando-se os respectivos controladores.

*Virtual Instrument* ou VI, é o nome dado a um programa desenvolvido em *LabVIEW* e que se divide em duas partes:

1. *Painel Frontal* - consiste na interface com o utilizador onde são colocados os *inputs*, controlos, como botões e interruptores e os *outputs*, indicadores, como LEDs ou gráficos. Dá-se o nome de controlo e indicador devido à semelhança das interfaces com alguns instrumentos de medida reais, sendo que os controlos simulam os comandos do instrumento e fornecem os dados ao diagrama de blocos e os indicadores, por sua vez, mostram os dados gerados pelo diagrama de blocos;
2. *Diagrama de Blocos* - contém o código do VI: blocos, funções ou subVIs, incluindo a representação gráfica dos controlos e indicadores adicionados ao painel frontal. Aqui as ligações entre elementos são feitas por fios de diferentes cores, estilos e espessuras dependendo do tipo de dados que *transportam*: *strings*, *inteiros*, *booleanos*, *etc.*



**Figura III.18** - Aspecto do a) Painel Frontal e do b) Diagrama de blocos de um VI.

Os elementos usados tanto no painel frontal como no diagrama de blocos, encontram-se organizados em duas paletas principais: a de controlos e a de funções (Figura III.19). A paleta de controlos apenas é disponibilizada no painel frontal e nela encontram-se subpaletas que contêm todos os botões, *LEDs*, controlos e indicadores numéricos, gráficos e um conjunto de formas geométricas que permitem decorar o painel frontal, entre outros elementos. A paleta de funções, por seu lado, só pode ser acedida a partir do diagrama de blocos e nela encontram-se subpaletas de estruturas como *for*, *while* ou *loop*, de funções numéricas ou aritméticas, de funções lógicas e, ainda, dos controladores dos instrumentos que se pretende controlar. Todavia, esta última subpaleta só fica disponível após a instalação dos referidos controladores.

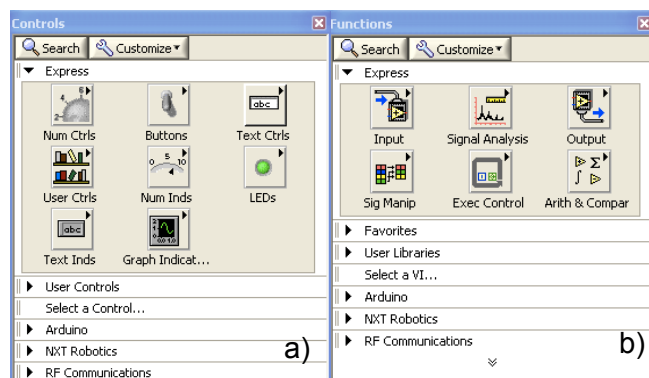


Figura III.19 - a) Paleta de controlos; b) Paleta de funções.

### III.3.1. Interface do software de aquisição

A nova versão do software de calibração de magnetómetros, desenvolvida em *LabVIEW*, responde aos seguintes requisitos:

1. **Controlo dos parâmetros de hardware do sistema**, ou seja, permite definir os endereços dos equipamentos, os canais da DAQ dos quais se pretende obter os sinais e definir o factor de escala associado aos magnetómetros e às bobinas. O facto destes parâmetros serem editáveis facilita eventuais trocas de equipamentos que venham a ser feitas;
2. **Controlo do campo magnético gerado no centro das bobinas de Helmholtz**. É importante existir este controlo no software para gerar o campo magnético ao qual os magnetómetros serão expostos;
3. **Compensação do offset do campo envolvente**. Este requisito complementa o anterior no sentido em que, através deste, é possível saber, com precisão, o campo magnético que está a ser adquirido pelos magnetómetros. Informação esta que é fundamental para a calibração dos magnetómetros;
4. **Aquisição dos valores de consumo de potência**. Esta funcionalidade é útil porque permite a monitorização dos consumos feitos pelo MAG15/28 durante a calibração;

Esta versão concede ao utilizador o controlo total sobre os requisitos acima mencionados através de controlos simples dispostos no painel frontal, o que dispensa ao utilizador conhecimentos sobre a linguagem de programação do *LabVIEW*, pois não é necessário aceder ao diagrama de blocos.

Antes de dar início ao desenvolvimento do programa foi necessário instalar os controladores de todos os instrumentos com que se pretendia comunicar: DAQ *Agilent 34970A*, fonte de alimentação *Agilent 3631A*, cabo GPIB/USB *Agilent 82357A* e *Arduino UNO*. O primeiro passo foi ligar todos os instrumentos ao PC, segundo, na janela *Getting Started* do *LabVIEW*, seleccionar a opção *Find Instrument Drivers*. Abre-se, então, uma nova janela onde conta uma lista dos instrumentos ligados. Seleccionou-se cada um dos instrumentos da lista afim de instalar os respectivos controladores. Posto isto, foi necessário instalar mais dois programas, *Agilent IO Libraries Suite* e *Visa Assistant* e, ainda, activar algumas opções para que o hardware da *Agilent* fosse reconhecido pelo software. Para activar as opções seguiram-se os passos:

1. Abrir *NI Measurements and Automation Explorer*;
2. *Tools* -> *NI-VISA* -> *VISA Options*;
3. *My System* -> *General Settings* -> *Passports*;
4. Seleccionar opção *NI-VISA Passport for Tulip*;
5. *Save*;
6. *Exit*;
7. Reabrir *NI Measurements and Automation Explorer*;

Os controladores do microcontrolador *Arduino UNO* foram instaladas recorrendo a um processo diferente e que é o que se segue:

1. Instalar *Arduino IDE*, juntamente com os controladores;
2. Instalar o *VIPM*;
3. Instalar *LIFA*;
4. Fazer o *upload* do *sketch* com o nome *LIFA\_Base.pde* e que se encontra em “*C:\Program Files\National Instruments\LabVIEW 2010\vi.lib\LabVIEW Interface for Arduino\Firmware\LVIFA\_Base\LVIFA\_Base.pde*” para o microcontrolador tendo, anteriormente, adoptado o código aos requisitos deste projecto.

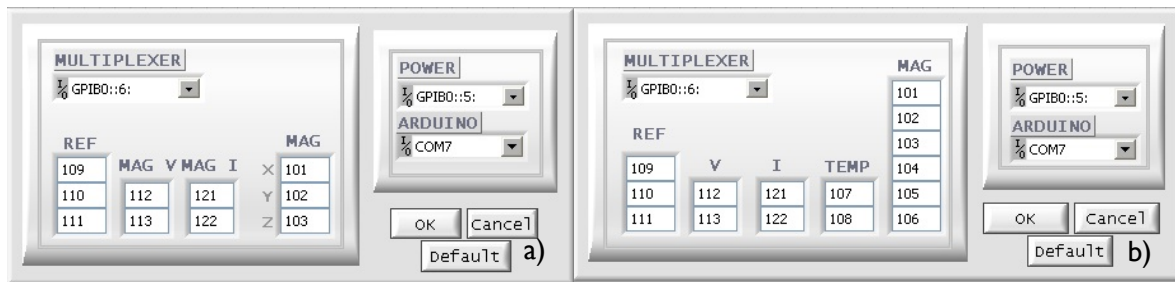
Terminado o procedimento acima descrito foi possível dar início ao desenvolvimento do novo programa em *LabVIEW*. O aspecto final da interface com o utilizador está presente na Figura III.22. No entanto, antes de chegar à interface principal, o utilizador terá de passar por duas outras, que servem para inicializar o programa com os parâmetros da configuração de trabalho (tipo de magnetómetro a calibrar, identificação dos endereços de comunicação dos equipamentos, etc.) e que se encontram representadas nas Figuras III.20 e III.21.



**Figura III.20** - Primeira janela de interface com o utilizador.

Na primeira interface o utilizador tem à disposição três botões que permitem: seleccionar qual dos magnetómetros irá calibrar, pressionando *MAG15* ou *MAG28*, ou não escolher nenhum e desistir da calibração, pressionando o botão *ABORT*, que resultará no fecho do *software*.

No caso do utilizador seleccionar o botão *MAG15* ou *MAG28*, a janela actual irá fechar e aparecerá uma nova janela de interface. Figura III.21-a) ou III.21-b), respectivamente.



**Figura III.21** - Interface relativa aos parâmetros do a) MAG15. b) MAG28.

Nesta segunda interface é possível definir os parâmetros de aquisição de dados do MAG15 ou do MAG28, consoante a opção escolhida na primeira interface. Estes parâmetros são: o endereço de comunicação da DAQ, da fonte de alimentação e do microcontrolador *Arduino*, *MULTIPLEXER*, *POWER* e *ARDUINO* respectivamente, e os canais da DAQ dos quais se pretende adquirir sinal *MAG V*, *MAG I*, *TEMP*, *V* e *I*. Estes sinais encontram-se organizados entre os 22 canais da carta e para fazer uma leitura desses mesmos canais é necessário indicar: a que *slot* está ligada a carta e o número do canal da carta do qual se pretende adquirir sinal. Por exemplo, *slot* 100, canal 01, equivale a 101.

No que respeita à Figura III.21 - a):

- ◆ Tabelas *MAG* e *REF* - os canais 101 a 103 e 109 a 111 recebem informação do campo magnético medido pelo MAG15 e pelo MAG REF, respectivamente. Havendo, em cada tabela, um canal por cada eixo X, Y ou Z;
- ◆ Tabelas *MAG V* e *MAG I* - os canais 112-113 e 121-122 recebem informação da tensão que alimenta os dois magnetómetros e da corrente que o MAG15 exige à fonte;
- ◆ Botões *Ok*, *Cancel* e *Default* - Depois de introduzidos os endereços dos instrumentos e os canais da carta, se se pressionar o botão *OK* o *LabVIEW* aceita os dados introduzidos pelo utilizador e estabelece, imediatamente, comunicação com os instrumentos. A janela da actual interface fecha e abre-se a da interface principal. Se, por outro lado, se pressionar o botão *Cancel*, o *LabVIEW* não estabelece qualquer comunicação e a actual janela de interface fecha-se. Por último, se se pressionar o botão *Default*, o *LabVIEW* restaura as definições por omissão, que correspondem às descritas nos dois pontos anteriores, e faz a comunicação segundo esses parâmetros, ignorando os introduzidos pelo utilizador. A janela da actual interface fecha e abre-se a da interface principal.

No que respeita à Figura III.21-b) todas as funções dos parâmetros acima descritos se repetem, havendo apenas a acrescentar os seguintes:

- ◆ Tabela *TEMP* - os canais 107 e 108 recebem informação da temperatura registada pelos dois termístores existentes dentro do MAG28;
- ◆ Tabela *MAG* - Esta tabela só difere da do MAG15 no sentido em que tem mais três canais de leitura, 104, 105 e 106, que recebem informação dos canais X, Y e Z *redundant*, respectivamente.

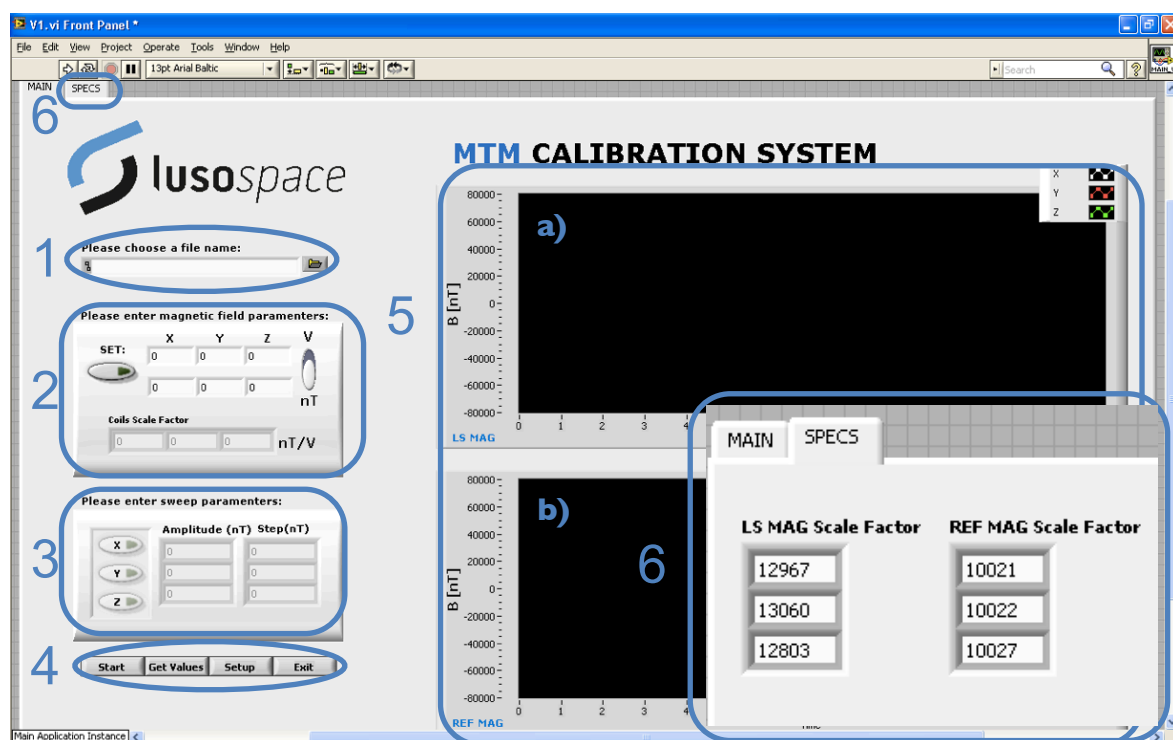


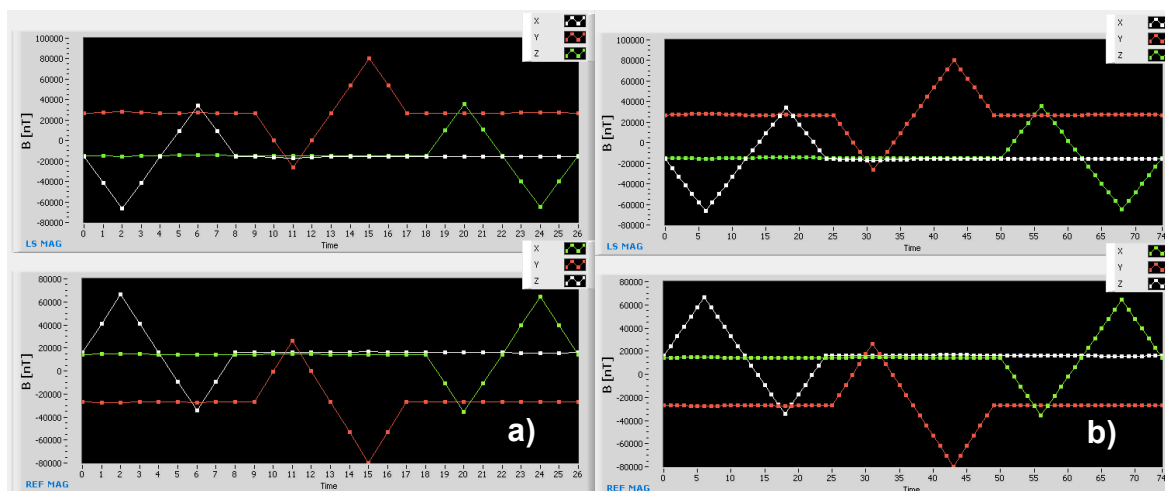
Figura III.22 - Painel frontal/interface do novo software criado em LabVIEW.

Na interface principal o utilizador tem à disposição um conjunto de funções, numeradas na Figura III.22 de 1 a 6, e que são explicadas em detalhe nos pontos que se seguem:

1. Esta entrada permite escolher o nome dado ao ficheiro que será guardado no fim de cada simulação e que contém uma tabela com a informação sobre o campo magnético medido por cada eixo do MAG15/28 e do MAG REF, a potência consumida pelo MAG15/28 e, no caso do MAG28, a temperatura registada pelos seus termístores;
2. A função *SET* só é activada quando o botão for pressionado e emitir uma luz verde. Esta permite ao utilizador controlar o campo magnético gerado por cada um dos eixos X, Y e Z das bobinas, sendo que o campo magnético pretendido no eixo X, Y e Z deverá ser colocado sob a coluna assinalada com um X, Y ou Z. Note-se que os valores de campo magnético podem ser introduzidos em *nT* ou em *V*, bastando para isso deslocar o botão deslizante no sentido da unidade pretendida. A linha denominada *Coils Scale Factor*, representa factor de escala para cada eixo das bobinas. Este valor é utilizado para converter os valores introduzidos de *nT* para *V*, para que depois possam ser enviados para a fonte que, por seu lado, os introduz nas bobinas. Além disto, também é utilizado na reconversão das medidas que chegam da DAQ em *V*. Os valores de campo magnético gerados pelo sistema de Helmholtz e captados pelo MAG15 e MAG REF são representados graficamente em 5 - a) e b), respectivamente;
3. A função *SWEEP* é accionada introduzindo valores, em *nT*, nos campos *Amplitude* e *Step* de cada eixo e *pressionando* os botões X, Y ou Z. O resultado serão dois gráficos, 5 - a) e b), com três sinais cada um, um por cada eixo, e com a amplitude e *step* definidos nos parâmetros. Sendo que a amplitude representa o campo máximo que será atingido, num determinado eixo, e o *step* a quantidade de campo introduzida, de cada vez, até se



atingir a amplitude desejada. Note-se que, mesmo que se escolha fazer um *sweep* nos três eixos, só é possível actuar um eixo de cada vez, o que implica que no gráfico apenas seja desenhado um sinal de cada vez, sendo primeiro o do X, depois o do Y e, finalmente o do Z (Figura III.23);



**Figura III.23** - Exemplo de funcionamento da função SWEEP cuja amplitude e step são, respectivamente, e para os três eixos: a) 60.000 nT e 30.000 nT; b) 60.000 nT e 10.000 nT.

4. Quanto aos botões *Start*, *Get Values*, *Setup* e *Exit*: o primeiro permite dar início às aquisições; o segundo abre uma janela *pop up* com os valores de potência consumida pelo MAG15/28; o terceiro interrompe a aquisição em curso e abre, novamente, a interface dos parâmetros de aquisição (Figura III.21) para que possam ser feitas alterações; o quarto, e último, botão interrompe a aquisição e fecha o programa;

5. Nesta zona são representados gráficos da intensidade do campo magnético gerado nos eixos X, Y e Z do a) MAG15/28 e do b) MAG REF, em função do número de pontos;

6. Nesta janela é representado o segundo painel da interface principal onde é possível ao utilizador redefinir um dos parâmetros relacionados com os magnetómetros, nomeadamente o seu factor de escala (que permite relacionar a tensão à saída do sensor com o campo magnético captado por ele);

Embora não faça parte do painel frontal, é importante especificar a função do microcontrolador referido anteriormente. O microcontrolador *Arduino UNO* permite a comunicação entre a caixa de relés e o PC. Para isso, foi criada um subVI cuja função é actuar os relés que estão dentro da caixa, sempre que se pretende inverter o sentido do campo magnético num dos eixos. O que é o equivalente a inverter o sentido da corrente nesse eixo.



## Capítulo IV - Procedimento de calibração dos magnetómetros da Lusospace

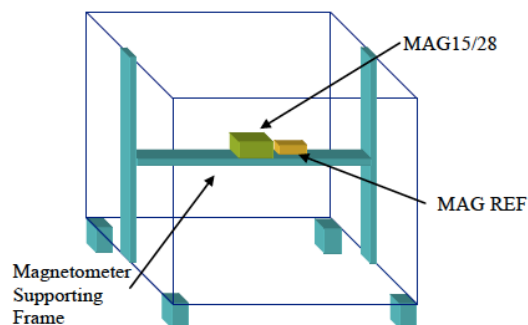
Este capítulo descreve o procedimento adoptado pela Lusospace na calibração dos seus magnetómetros, bem como sobre a teoria inerente a esse procedimento.

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), calibração é uma, *“ Operação que estabelece, sob condições especificadas, num primeiro passo, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; num segundo passo, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação.” [24]*

Por outras palavras, calibração é o nome dado ao conjunto de operações que permitem estabelecer uma relação entre: o valor de uma grandeza medido por um instrumento, neste caso o MAG15/28, por comparação com o valor, da mesma grandeza, medido por um instrumento padrão (de classe superior, i.e., já calibrado), o MAG REF. O objectivo da calibração dos magnetómetros é, então, obter as curvas ou equações que relacionam o valor do campo magnético,  $x$ , captado pelo sensor, com o sinal devolvido por ele, neste caso um sinal em tensão  $y$ . Esta relação, traduz-se em  $y=F(x)$ . Além disto, também se pretende obter outros parâmetros/características relacionados com o magnetómetro como o factor de escala, linearidade, potência consumida, alinhamento com a base - sistema de Helmholtz - e a ortogonalidade.

Para dar início ao processo de calibração é necessário:

1. Colocar e alinhar o MAG15/28 a ser calibrado e o MAG REF no centro do sistema de Helmholtz (Figura IV.1), que é onde o campo é mais uniforme. O alinhamento é feito com recurso a lasers e pontos de referência marcados na estrutura que suporta as cobinas. Como, não é possível colocar os dois magnetómetros exactamente no mesmo sítio, devido a restrições físicas, gera-se um *offset* no campo medido por cada magnetómetro;



**Figura IV.1** - Disposição dos magnetómetros no sistema de Helmholtz [25].

2. Ligar os magnetómetros ao módulo de aquisição;
3. Correr *choose.vi* (programa de calibração *LabVIEW*);
4. Definir condições de calibração: fim de escala e resolução, tipicamente, 65.000 nT e 5.000 nT, respectivamente. Sendo que estes valores são definidos pelos requisitos acordados com o cliente;

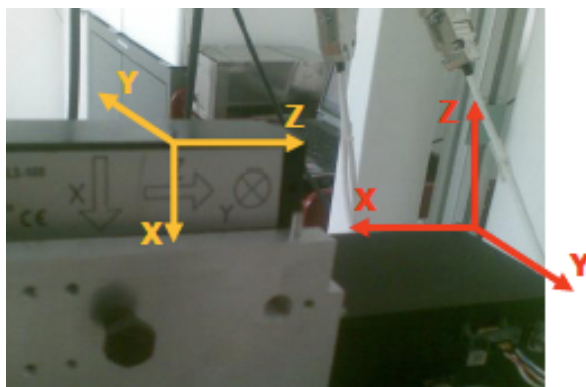
5. Recolher amostras do campo magnético medido pelo MAG REF, sem que as bobinas estejam actuadas. Com este passo pretende-se determinar o valor do campo magnético de fundo para depois o subtrair às medições que se seguirem;
6. Iniciar a função *SWEEP* para todas as coordenadas, considerando os parâmetros definidos em 4.;
7. Processar os dados amostrados em 6., e que se encontram num ficheiro \*.ls, em *MATLAB* para obter, então, os parâmetros/características do magnetómetro que está a ser calibrado.

## IV.1 - Tratamento dos dados da calibração

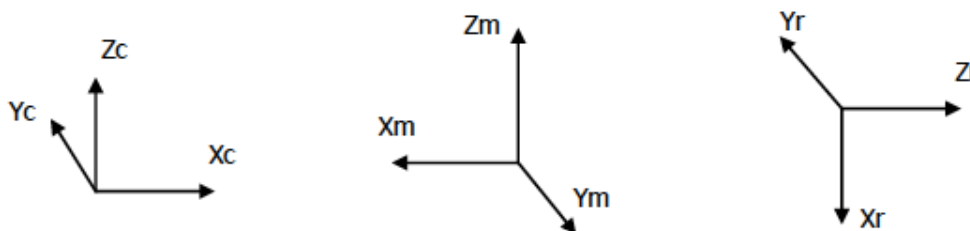
Neste subcapítulo é descrito o processo de determinação do factor de escala, linearidade, potência consumida, alinhamento com a base - sistema de Helmholtz e a ortogonalidade do magnetómetro que está a ser calibrado, recorrendo aos dados obtidos no ponto 7, descrito anteriormente.

### IV.1.1 - Factor de escala

Antes de explicar como se determina o factor de escala é importante referir a relação existente entre os referenciais de cada magnetómetro e do sistema de Helmholtz. Na Figura IV.2 estão representados os referenciais de cada magnetómetro, sendo o amarelo correspondente ao MAG REF e o vermelho ao MAG15/28. Esta configuração é definida pelo alinhamento dos sensores dentro de cada magnetómetro. Na Figura IV.3, estão representados os eixos dos magnetómetros e do sistema de Helmholtz.



**Figura IV.2** - Representação dos referenciais dos sensores do MAG REF e do MAG15/28 [26].



**Figura IV.3** - Representação da relação entre os eixos dos magnetómetros e sistema de Helmholtz. Sendo índice “c-coils” correspondente às bobinas, “m-mag” ao MAG15/28 e “r-ref” ao MAG REF [26].

Como se verifica na Figura IV.2, os sensores dos magnetómetros não se encontram na mesma posição e, quando são feitas leituras do MAG REF é necessário transpor as medidas padrão obtidas para o referencial do MAG15/28, para estabelecer uma comparação entre os valores medidos pelos dois magnetómetros no mesmo ponto. Só é possível fazer esta comparação devido à uniformidade do campo ao longo da plataforma. Para a translação dos eixos entre o MAG REF e o MAG15/28 recorre-se à seguinte matriz unitária:

$$A_{R,M} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (IV.1)$$

Assim a translação do campo magnético para o referencial do MAG15/28 é, então:

$$B_{RM} = A_{R,M} \cdot B_R \quad (IV.2)$$

Onde,  $B_R$  é a matriz cujos elementos correspondem às medidas de campo magnético feitas pelo MAG REF e  $B_{RM}$  a matriz cujos elementos correspondem às medidas de campo magnético medidas pelo MAG REF, expressas no referencial do MAG15/28.

A transposição, propriamente dita, consiste em considerar os contributos da diferença da leitura do campo entre as posições dos magnetómetros para todas as coordenadas. Para o efeito, é necessário uma matriz  $B_{Dif}$  (Eq. IV.3) que expresse a diferença entre o campo magnético medido pelo MAG REF no referencial do MAG15/28,  $B_M$ , e o valor medido pelo MAG REF na sua posição após translação. E, ainda, uma matriz de transposição,  $M_{Dif}$ , determinada pela Lusospace aquando da calibração do MAG REF e usada como padrão em todas as calibrações. A matriz  $B_{Dif}$  é dada pela expressão:

$$B_{Dif} = B_M - B_{RM} \quad (IV.3)$$

Onde  $B_{Dif}$  corresponde a,

$$B_{Dif} = M_{Dif} B_{RM} + b \quad (IV.4)$$

Relacionando as equações IV.2 e IV.3 obtém-se, finalmente,

$$B_M = B_{RM} + M_{Dif}(B_{RM} - B_{RM \text{ earth}}) + b \quad (IV.5)$$

Agora que expressão de  $B_M$  foi determinada, é possível obter o seu valor através das medidas de campo magnético do MAG REF. Para isso, faz-se variar, à vez, cada uma das componentes do campo magnético, ficando as restantes a zero, e aplica-se uma regressão linear à equação IV.5 resultante. Contudo, numa situação real todas as componentes são diferentes de zero então, o resultado que tem interesse para a calibração é composto pela soma das contribuições de todas as componentes, obtidas a partir da referida regressão linear e que são dadas por:

$$\begin{bmatrix} V_{X_S} \\ V_{Y_S} \\ V_{Z_S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{X_M, X_S} & \alpha_{Y_M, X_S} & \alpha_{Z_M, X_S} \\ \alpha_{X_M, Y_S} & \alpha_{Y_M, Y_S} & \alpha_{Z_M, Y_S} \\ \alpha_{X_M, Z_S} & \alpha_{Y_M, Z_S} & \alpha_{Z_M, Z_S} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{XM} \\ B_{YM} \\ B_{ZM} \end{bmatrix} \Leftrightarrow V_S = A_{VS, BM} \cdot B_M \quad (IV.6)$$

A equação IV.6 relaciona a tensão monitorizada pelo sensor com o campo magnético medido, ou seja,  $V/nT$ . No entanto, para o factor de escala pretende-se  $nT/V$ . Para obter esta relação, a matriz  $A_{VS,BM}$ , é decomposta obtendo-se a matriz diagonal dos factores de escala,  $S_F$ , através da norma das linhas e a matriz da correcção dos desvios dos eixos,  $A_C$ .

$$A_{VS,BM}^{-1} = \begin{bmatrix} S_{f_x} & 0 & 0 \\ 0 & S_{f_y} & 0 \\ 0 & 0 & S_{f_z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{C_{1,1}} & A_{C_{1,2}} & A_{C_{1,3}} \\ A_{C_{2,1}} & A_{C_{2,2}} & A_{C_{2,3}} \\ A_{C_{3,1}} & A_{C_{3,2}} & A_{C_{3,3}} \end{bmatrix} \Leftrightarrow A_{VS,BM}^{-1} = S_F \cdot A_C \quad (IV.7)$$

## IV.1.2 - Linearidade

Para se determinar o parâmetro linearidade é necessário quantificar a aproximação,  $d$ , que existe, ou não, entre a curva de medição real e a curva de um modelo. Neste caso, a curva real é a dos valores de  $V_S$ , que corresponde aos valores obtidos à saída do sensor, em tensão, e a curva do modelo é a dos valores de  $B_M$ , que corresponde ao campo magnético captado pelo sensor do MAG REF, em  $nT$ .

Calculada a aproximação,  $d$ , é possível determinar a linearidade recorrendo à equação V.10, onde  $L$  é a linearidade e  $FS$  o fim de escala do sensor.

$$L = \left( \frac{d}{FS} \right) \cdot 100 \quad (IV.8)$$

## IV.1.3 - Ruído e Offset

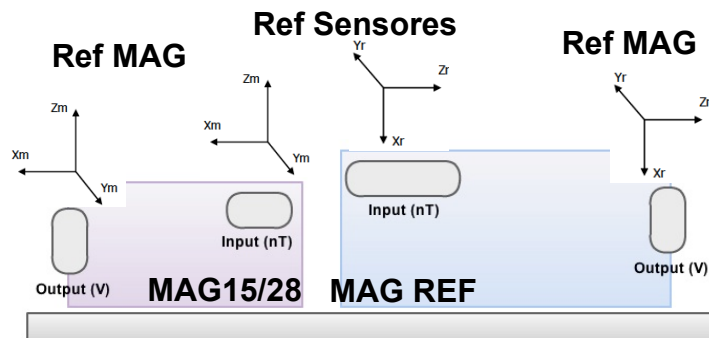
Para determinar o ruído e o *offset* em cada eixo, o magnetómetro é colocado numa caixa feita de uma liga de NiFe, mais conhecida por *mu-metal* que, dada a sua elevada permeabilidade, permite atenuar a influência de campos magnéticos estáticos. Estando o magnetómetro dentro da caixa, são feitas  $N$  medições do campo magnético, recorrendo ao programa desenvolvido em *LabVIEW*, que depois são exportadas para um ficheiro *\*.ls*. Os dados das medições são depois processados em vários ficheiros *script* do *MATLAB*, que no fim retornam os valores do ruído e *offset*.

## IV.1.4 - Potência consumida

A potência consumida pelo MAG15/28 é determinada através da expressão  $P = VI$  (IV.9). Sendo  $V$  e  $I$  medidos através do programa desenvolvido em *LabVIEW*, referidos no capítulo III.3.1.

## IV.1.5 - Alinhamento e Ortogonalidade

O alinhamento consiste no desvio, em graus, que cada eixo do referencial dos sensores tem em relação a cada eixo do referencial do próprio magnetómetro (Figura IV.4). Numa situação ideal, os eixos seriam perfeitamente coincidentes, mas na realidade isso não acontece, daí a necessidade de calcular o alinhamento.



**Figura IV.4** - Alinhamento dos referenciais dos sensores com os respectivos referenciais fixados para os magnetómetros.

A ortogonalidade permite quantificar, em graus, o desvio existente entre os sensores e o plano ortogonal onde estão inseridos.

Tanto o alinhamento como a ortogonalidade são obtidos através da matriz  $A_D$  :

$$A_D = S_F A_{VS,BM}^{-1} \quad (IV.10)$$

Sendo que, as linhas representam os eixos e as colunas as contribuições para o desvio do eixo de cada componente. Então, a partir desta matriz é possível calcular o alinhamento e a ortogonalidade. Neste último caso, os resultados são obtidos através da aplicação de relações trigonométricas às linhas da matriz  $A_D$  e que representam, no fim, os desvios de cada par de eixos ( $X\_Y$ ,  $Y\_Z$ ,  $X\_Z$ ) dos  $90^\circ$  que os devem distanciar.

O exemplo dos possíveis requisitos exigidos por um cliente para o seu magnetómetro.

**Tabela IV.1** - Exemplo de uns possíveis requisitos exigidos por um cliente para o seu magnetómetro.

Parâmetro	Critério
Factor de escala	12.800 nT/V $\pm$ 5%
Linearidade	<0.5 % (FS: $\pm$ 64.000 nT)
Ruído	$\leq 3$ nT/Hz <sup>0.5</sup>
Offset	$\leq 500$ nT
Potência consumida	<1,0 W
Alinhamento	Menor do que $\pm 1^\circ$ c/ precisão de medida melhor do que $0.1^\circ$
Ortogonalidade	Melhor do que $\pm 1^\circ$





## Capítulo V - Conclusão e perspectivas futuras

O presente projecto de dissertação baseou-se na reestruturação e melhoramento de alguns elementos que compunham o sistema de calibração de magnetómetros da empresa Lusospace e, ainda, na caracterização do campo magnético gerado pelo seu sistema de Helmholtz. Esta reestruturação dividiu-se em duas fases essenciais: a primeira foi a substituição das duas interfaces que ligavam o magnetómetro a ser calibrado e o magnetómetro de referência à DAQ. A segunda fase foi a substituição do programa em *LabVIEW* que fazia o controlo dos equipamentos e a aquisição e tratamento dos dados provenientes dos sensores.

No que diz respeito à primeira fase da reestruturação, parte da estratégia passou por projectar e construir uma interface, ou módulo de aquisição, que concentrasse as funções das outras duas. No entanto, dado que a Lusospace se dedica ao fabrico de dois magnetómetros distintos, MAG15 e MAG28, foi necessário construir um módulo de aquisição para cada tipo de magnetómetro. Cada um destes módulos de aquisição é composto por uma placa de circuito impresso (PCB) cuja função é encaminhar os dados provenientes dos magnetómetros para o sistema de aquisição de dados. Testada e verificada a sua conformidade, as duas placas foram colocadas nas respectivas caixas, dando forma aos módulos de aquisição de cada magnetómetro. A utilização destes módulos conforme o tipo de magnetómetro a calibrar é definida na interface do programa *LabVIEW* que controla o sistema.

Quanto à segunda fase, foi desenvolvido um novo programa em *LabVIEW*. Este novo programa para além de contemplar o novo *hardware* construído no âmbito deste trabalho, e que permitiu acrescentar mais flexibilidade ao sistema de calibração, foi feito de raiz numa versão mais recente do *LabVIEW* adoptando programação por eventos o que torna o código mais simples, fiável e robusto.

Uma vez que o programa foi feito de raiz houve um conjunto de dificuldades que tiveram de ser ultrapassadas:

- ◆ Estabelecimento da comunicação entre os vários equipamentos, nomeadamente com a caixa de relés cuja antiga interface paralela foi substituída por um microcontrolador *Arduino UNO*, ligado através de USB;
- ◆ A implementação das funções SWEEP e Offset também se revelaram um verdadeiro desafio devido ao número de variáveis a elas associadas e à complexidade de se estar a lidar com equipamento sensível como o magnetómetro e com uma grandeza física como o campo magnético;

Uma vez concluída com sucesso a fase de testes e verificação do funcionamento de todos os equipamentos, e das funcionalidades do programa *LabVIEW* no controlo e aquisição integrado desses equipamentos. Fazia parte do plano de trabalhos realizar a caracterização do campo magnético gerado pelo sistema de Helmholtz e a execução do procedimento de calibração num magnetómetro. Porém, a execução dos procedimentos experimentais finais não foram possíveis devido a uma avaria no magnetómetro de referência, o que impossibilita uma aquisição de dados completa dentro do prazo definido para conclusão deste trabalho. Antes da ocorrência da avaria houve uma aquisição preliminar de dados, representados no gráfico da Figura III.23, onde ficou

demonstrado o perfeito funcionamento do *hardware* e *software* desenvolvidos, pela resposta, linearidade e baixo ruído apresentados nos dados adquiridos.

Numa perspectiva futura de curto prazo, deve-se proceder à referida caracterização do sistema de Helmholtz e de um magnetómetro, concluindo todo o procedimento de calibração de ambos, para se ter uma melhor avaliação do funcionamento das soluções implementadas.

## Capítulo VI - Bibliografia

1. Piergentili, F., G.P. Candini, and M. Zannoni, *Design, Manufacturing, and Test of a Real-Time, Three-Axis Magnetic Field Simulator*. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2011. **47**(2): p. 1369-1379.
2. Laila, D.S., M. Lovera, and A. Astolfi, *A numerical algorithm as an observer for spacecraft attitude determination*. Decision and Control, 2006 45th IEEE Conference on, 2006: p. 1568-1573.
3. Crassidis, J.L., K.-L. Lai, and R.R. Harman, *Real-time attitude-independent three-axis magnetometer calibration*, 2005.
4. Renaudin, V., M.H. Afzal, and G. Lachapelle, *Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain*. 2010.
5. Fan, J., X.P. Li, and P. Ripka, *Low power orthogonal fluxgate sensor with electroplated Ni [sub 80]Fe[sub 20]/Cu wire*. Journal of Applied Physics, 2006. **99**(8): p. 08B311.
6. Ryabinov, M.N., *Evaluation and provision of reliability for proton precession magnetometers*. Measurement Techniques, 1968. **11**(4): p. 476-477.
7. Granata, C., A. Vettoliere, and M. Russo, *Improved superconducting quantum interference device magnetometer for low cross talk operation*. Applied Physics Letters, 2006. **88**(21): p. 212506.
8. Li, G., H. Zhou, and C. Xiao. *The design of measurement system in optically pumped magnetometer based on CPLD and embedded system*. in *Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), 2011 2nd International Conference on*. 2011.
9. *3-axis Fluxgate Magnetic Field Sensor FL3-100*. Available from: <http://www.stefan-mayer.com/FL3.htm>.
10. Antunes, C.E., et al., *Magnetómetro de fluxo saturado com núcleo toroidal*.
11. Silva, E.C.d., *Desenvolvimento de transdutor baseado na fase da magnetoimpedância gigante para medição de campos biomagnéticos*, 2011, Puntificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
12. Honeywell, *AN212 Handling of Sensor Bridge Offset*. 2010.
13. Bronaugh, E.L. *Helmholtz coils for calibration of probes and sensors: limits of magnetic field accuracy and uniformity*. in *Electromagnetic Compatibility, 1995. Symposium Record. 1995 IEEE International Symposium on*. 1995.
14. *Esquema de um sistema de Helmholtz simples*. Available from: <http://physicsx.pr.erau.edu/HelmholtzCoils/index.html>.
15. Spencer, J.D. and R.H. Davis. *Helmholtz coils for MIL-STD-462D RS101 testing*. in *Electromagnetic Compatibility, 1999 IEEE International Symposium on*. 1999.
16. Li, T.T.-K., *Tri-Axial Square Helmholtz Coil for Neutron EDM Experiment*, in *Physics2004*, Chinese University of Hong Kong.
17. Young, H.H., H.H. Byung, and Y.L. Soo, *Magnetic propulsion of a magnetic device using three square-Helmholtz coils and a square-Maxwell coil*. 2010.
18. *Stony Brook PHY142 - Classical Physics II, in Lecture 19 - Biot-Savart Law*2012.

19. Pastena, M. and M. Grassi, *Optimum design of a three-axis magnetic field simulator*. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2002. **38**(2): p. 488-501.
20. Eurocircuits, *Technical Specifications "Pooling" & "On demand" Services*, 2010: [www.eurocircuits.com](http://www.eurocircuits.com).
21. Eurocircuits, *Design Guidelines - January 2010*, 2010: [www.eurocircuits.com](http://www.eurocircuits.com).
22. Corporation, N.S., *LM117/LM317A/LM317 3-Terminal Adjustable Regulator*, in *Application Hints* 2007. p. 7 and 9.
23. Harke, *20-channel multiplexer Agilent 34901A with 20 K-type thermocouples. Plug-in module for the data acquisition system Agilent 34970A*, 2009.
24. Qualidade, I.P.d., *Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM)*, 2012.
25. LusoSpace, *Calibration System Specification*, 2004.
26. LusoSpace, *Magnetometer Calibration Procedure*, 2009.

## Apêndice A - Pin-Out MAG28

MAG28/DB25	
Pin	Descrição
1	X nominal
2	Y nominal
3	Z nominal
4	<i>Thermistor 1</i>
5	<i>Não Ligado</i>
6	X Redundant
7	Y Redundant
8	Z Redundant
9	Thermistor 2
10 a 13	<i>Não Ligado</i>
14	X Nominal/ <i>Return</i>
15	Y Nominal/ <i>Return</i>
16	Z Nominal/ <i>Return</i>
17	Thermistor 1/ <i>Return</i>
18	<i>Não Ligado</i>
19	X Redundant/ <i>Return</i>
20	Y Redundant/ <i>Return</i>
21	Z Redundant/ <i>Return</i>
22	Thermistor 2/ <i>Return</i>
23 a 25	<i>Não Ligado</i>

DAQ/DB37	
Pin	Descrição
1	X nominal
2	Y nominal
3	Z nominal
4	X Redundant
5	Y Redundant
6	Z Redundant
7	<i>Thermistor 1</i>
8	Thermistor 2
9	X REF
10	Y REF
11	Z REF
12 a 14	<i>Não Ligado</i>
15	+28 V
16	<i>Não Ligado</i>
17	+28 V
18 e 19	<i>Não Ligado</i>
20	X Nominal/ <i>Return</i>
21	Y Nominal/ <i>Return</i>
22	Z Nominal/ <i>Return</i>
23	X Redundant/ <i>Return</i>
24	Y Redundant/ <i>Return</i>
25	Z Redundant/ <i>Return</i>
26	Thermistor 1/ <i>Return</i>
27	Thermistor 2/ <i>Return</i>
28 a 30	MAG REF/ <i>Return</i>
31 a 33	<i>Não Ligado</i>
34	+28V(Current)/ <i>Return</i>
36	+28 V(Voltage)/ <i>Return</i>
35 e 37	<i>Não Ligado</i>

